



Metodologia di previsione della radiazione solare con anticipo di 24/48 ore e sviluppo di un tool software per il calcolo della producibilità di impianti ibridi CSP-PV

I. Balog, G. Caputo, A. Benedetti, R. Siviero

Metodologia di previsione della radiazione solare con anticipo di 24/48 ore e sviluppo di un tool software per il calcolo della producibilità di impianti ibridi CSP-PV

I. Balog, G. Caputo, A. Benedetti, R. Siviero (ENEA)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: *1.9 Solare Termodinamico*

Linea di attività: LA 1.44 – Ibridizzazione e integrazione di impianti CSP con altre tecnologie: *modelli di previsione a breve termine della radiazione solare*

Responsabile del Progetto: Alberto Giaconia, ENEA

Indice

SOMMARIO	4
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI	5
1 INTRODUZIONE.....	6
2 LA RADIAZIONE AL SUOLO.....	6
3 I MODELLI DI TRASMISSIONE DELLA RADIAZIONE IN ATMOSFERA	8
4 MISURAZIONE DELLA DNI E MESSA A PUNTO DEL MODELLO	10
4.1 DESCRIZIONE DELLA CENTRALINA DI ACQUISIZIONE-DATI SOLARIMETRICA.....	10
5 ANALISI DEI DATI E SVILUPPO DEI MODELLI.....	12
5.1 VALIDAZIONE DEI DATI DI MISURA	14
5.2 CORRELAZIONE $DNI = F(GHI)$	17
6 PREVISIONE A 24H E 48H DELLA DNI.....	22
6.1 GENNAIO 2020 24H.....	23
6.2 FEBBRAIO 2020 24H	25
6.3 MARZO 2020 24H	27
6.4 APRILE 2020 24H	29
6.5 MAGGIO 2020 24H	31
6.6 GIUGNO 2020 24H	33
6.7 LUGLIO 2020 24H.....	35
6.8 AGOSTO 2020 24H	37
6.9 SETTEMBRE 2020 24H	39
6.10 OTTOBRE 2020 24H.....	41
6.11 NOVEMBRE 2020 24H	43
6.12 DICEMBRE 2020 24H	45
6.13 RISULTATI RIASSUNTIVI.....	47
6.14 CASO STUDIO	51
CONCLUSIONI	53
APPENDICE. SIGLE, ABBREVIAZIONI, GRANDEZZE, UNITÀ DI MISURA	54
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	56

Sommario

E' effettuata la previsione dell'irradiazione solare diretta normale (DNI) a 24h e 48h per il sito ENEA Casaccia che ospita la Stazione meteo-solarimetrica della Divisione STSN per la misura delle irradianze diretta normale, globale orizzontale (GHI) e diffusa orizzontale (Diff).

La misura contemporanea delle tre irradianze ha consentito la messa a punto del modello per la stima della DNI a partire dai soli valori della GHI. Il modello così sviluppato è stato utilizzato per la previsione della DNI partendo dai valori di previsione a 24h e 48h per la GHI attraverso un modello ENEA.

E' stato fatto un confronto tra la previsione della DNI così calcolata e la previsione della DNI in uscita dal modello WRF-ARW.

Infine è stata stimata l'energia prodotta da un impianto solare a concentrazione (CSP) di tipo parabolico lineare considerando la DNI prevista dal nostro modello e confrontata con l'energia prodotta considerando la DNI acquisita al suolo, inoltre i risultati del modello di previsione della radiazione sono di input per il tool software per il calcolo della producibilità di impianti ibridi CSP-PV sviluppato in collaborazione con PoliMI nelle linee di attività 1.39, 1.40 e 1.41.

Acronimi e abbreviazioni

<i>DNI</i>	Irradiazione diretta normale (Direct Normal Irradiation)
<i>GHI</i>	Irradiazione globale su piano orizzontale (Global Horizontal Irradiation)
<i>Dif. HI</i>	Irradiazione diffusa sul piano orizzontale
<i>ENI</i>	Irradianza extraatmosferica su piano normale
<i>EHI</i>	Irradiazione extraatmosferica su piano orizzontale
<i>MBE</i>	Mean Bias Error
<i>MAE</i>	Mean Absolute Error
<i>RMSE</i>	Root Mean Squared Error
<i>CSP</i>	Impianto di potenza a concentrazione solare (Concentrated Solar Power)
<i>GMT</i>	Tempo medio di Greenwich (<i>GMT</i>) (Greenwich Mean Time)
<i>CET</i>	Tempo (ora) medio del fuso dell'Europa Centrale (Central European Time)
<i>s.q.m.</i>	scarto quadratico medio
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

1 Introduzione

Ogni anno sulla terra arriva dal sole una quantità di energia dell'ordine di *10.000* volte il consumo energetico mondiale. Ovviamente questo flusso rende possibile la vita come la conosciamo. Dati i grandi problemi energetici e ambientali che l'umanità dovrà fronteggiare, la possibilità di impiegarlo anche per produrre elettricità e calore incontra un favore crescente fra il pubblico e accende le speranze di chi punta ad aumentare la quota di produzione energetica rinnovabile, anche al fine di ridurre l'emissione di gas serra nell'atmosfera. Fra le varie tecnologie solari quella degli impianti solari termici a concentrazione (*CSP*) consente di produrre quantità significative di elettricità e di idrogeno a costi competitivi. Le tecnologie solari termodinamiche a concentrazione utilizzano la radiazione "diretta" del sole, concentrandola tramite specchi verso un "ricevitore" che trasforma la radiazione in calore ad alta temperatura; esso viene trasferito da un "fluido termovettore" (aria, olio diatermico, acqua/vapore, miscele di sali fusi) a un sistema di "utilizzo" (conversione termodinamica ad es. con turbina a vapore o motore stirling, processo termochimico, processi industriali). Lo studio tedesco MED-CSP ha valutato in *7 TWh/anno* il potenziale italiano economicamente sfruttabile con questa tecnologia solare; il suo sviluppo assume però un'importanza anche in chiave di sviluppo industriale teso all'esportazione di impianti e componenti. In Italia il programma di ricerca e sviluppo più significativo, dopo l'esperienza ENEL di Eurelios negli anni '80, è stato intrapreso dall'ENEA sulla base della legge 388/2000.

2 LA RADIAZIONE AL SUOLO

I dispositivi che raccolgono l'energia trasportata dalla radiazione proveniente dal Sole sono posti a livello del suolo, sia che si tratti della superficie captante dei pannelli fotovoltaici o termici, sia che ci si riferisca agli specchi riflettenti di un impianto solare a concentrazione. In tutti questi casi l'irradianza disponibile al suolo è inferiore a quella presente al di fuori dell'atmosfera in quanto intervengono fattori che globalmente determinano un effetto netto attenuativo (Figura 1):

- a) nell'attraversare l'atmosfera una frazione dei raggi solari viene assorbita o deviata (scattering) a seguito degli urti con le molecole dell'atmosfera stessa (inclusi il vapor acqueo, le nubi e gli aerosol). La radiazione solare diretta, ossia quella costituita dai soli raggi che attraversano lo spessore atmosferico senza esserne perturbati, arriva al suolo da una direzione che, essendo determinata dalla posizione del Sole nella volta celeste, cambia continuamente durante l'intervallo diurno;
- b) la frazione della radiazione solare che invece urta le molecole dell'atmosfera, se non assorbita, è deviata in tutte le direzioni: parte si allontana verso lo spazio e parte raggiunge il suolo: quest'ultima è detta radiazione solare diffusa e proviene da tutte le direzioni dell'emisfero celeste.

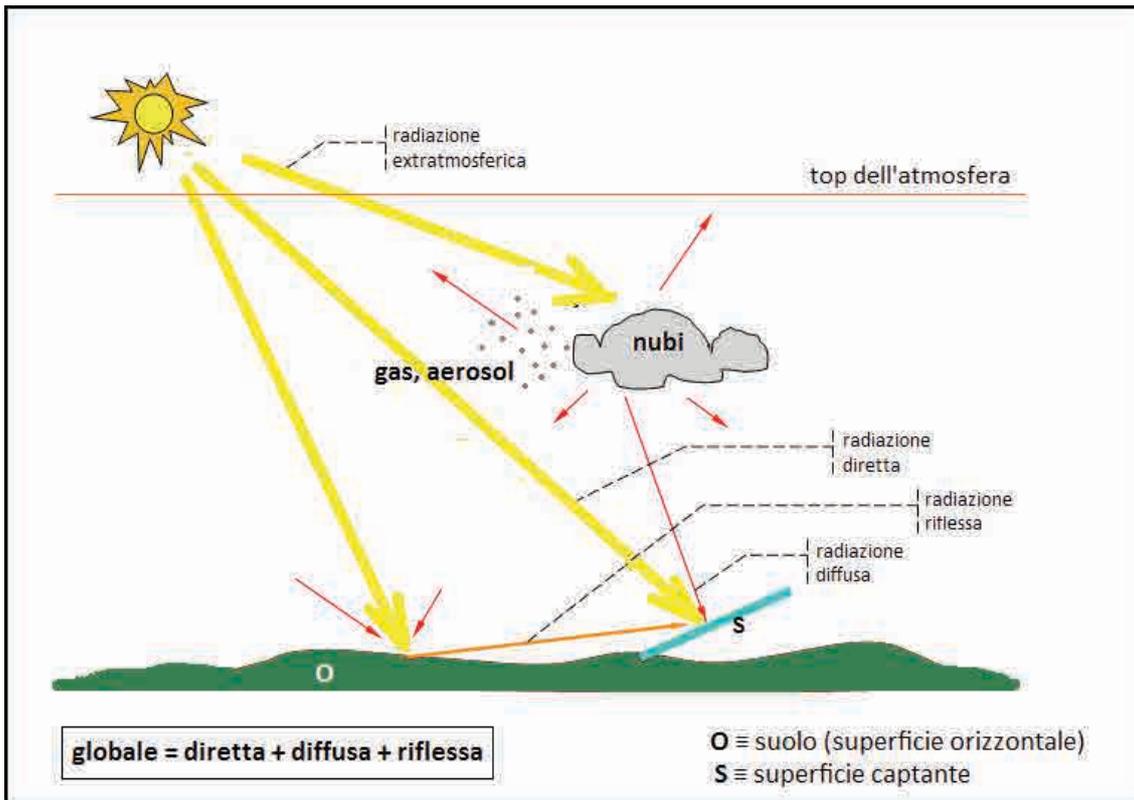


Figura 1 – Scomposizione della radiazione al suolo nelle sue componenti.

L'irradianza solare alla sommità dell'atmosfera, ortogonalmente alla direzione dei raggi, con la Terra alla distanza 'media' dal Sole, è data dalla costante solare $i_{sc} = 1366.9 \text{ W/m}^2$. In un dato istante l'irradianza solare globale che investe una superficie disposta orizzontalmente è data dalla somma delle componenti diretta e diffusa, mentre per una superficie inclinata rispetto al piano orizzontale, alle due componenti diretta e diffusa vi si aggiunge il contributo dell'irradianza solare riflessa dal suolo (Figura 1). Considerando per il momento la superficie orizzontale, si può scrivere:

$$\dot{I} = \dot{I}_b + \dot{I}_d \quad [1]$$

in cui con \dot{I}_b è indicata la radiazione diretta, \dot{I}_d indica quella diffusa e infine il simbolo \dot{I} senza alcun pedice indica quella globale. Come si è visto in precedenza, l'irradianza è funzione dell'orientazione della superficie ricevente rispetto alla direzione dei raggi. Infatti, se l'angolo d'incidenza ϑ è nullo, ossia se la superficie è normale ai raggi, l'irradianza è massima, mentre nel caso generale essa si ridurrà di un fattore pari a $\cos\vartheta$ (in particolare $\cos\vartheta_z$ per la giacitura orizzontale). I ragionamenti fatti or ora si applicano bene alla radiazione diretta, la cui direzione è univoca perché individuata dalla posizione del Sole, ma non alla radiazione diffusa, che per definizione proviene da tutte le direzioni dell'emisfero sopra la superficie. Il legame fra l'irradianza diretta sul piano normale \dot{I}_{bn} e quella sul piano orizzontale \dot{I}_b è dunque:

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{bn} \cos\vartheta_z \quad [2]$$

e l'espressione per la radiazione globale potrà esplicitarsi come segue:

$$\dot{I} = \dot{I}_{bn} \cos\vartheta_z + \dot{I}_d \quad [3]$$

\dot{I}_{bn} è nota anche con l'acronimo *DNI* (dall'inglese: Direct Normal Irradiance/irradiation).

Le considerazioni appena svolte valgono a rigore per le irradianze. Ciò nonostante esse possono essere estese senza pregiudizio ai fini della precisione anche per irradiazioni relative a intervalli finiti di tempo purchè non molto lunghi (al più orari). In tal caso per $\cos\vartheta_z$ deve intendersi il valor medio nell'intervallo considerato o, con approssimazione ancora accettabile, si prende per ϑ_z il valore centrale dell'intervallo di riferimento.

3 I modelli di trasmissione della radiazione in atmosfera

Perché le formule precedenti siano di una qualche utilità nella stima della radiazione solare al suolo, è necessario disporre di espressioni che correlano le irradianze (diretta normale, diffusa orizzontale e conseguentemente globale orizzontale) alle differenti condizioni del tempo atmosferico. Allo scopo sono qui riassunti schematicamente i diversi fattori che concorrono all'attenuazione della radiazione diretta:

- 1) la lunghezza effettiva del percorso dei raggi,
- 2) il tipo e la densità delle molecole d'aria gassose incontrate durante il percorso,
- 3) l'entità del vapore acqueo (umidità) e degli aerosol (micro-particelle solide inquinanti) presenti e infine
- 4) l'intensità delle nubi.

Nella letteratura tecnica sono attestati numerosi modelli empirici che mettono in relazione l'irradiazione al suolo con i fattori elencati sopra. L'irradiazione studiata è di volta in volta la *DNI*, quella diffusa sul piano orizzontale e quella globale (sempre su piano orizzontale); ovvero oraria, giornaliera e giornaliera media mensile.

Per quanto riguarda i raggi solari diretti, definito il coefficiente di trasmissione diretta in atmosfera come rapporto fra le irradianze diretta ed extraatmosferica normali:

$$K_{bn} = \frac{\dot{I}_{bn}}{\dot{I}_{on}} \quad [4]$$

è possibile tradurre formalmente l'influenza su K_{bn} dei fattori prima elencati. Uno schema abbastanza generale è il seguente (solitamente riportato in letteratura in una forma leggermente diversa):

$$K_{bn} = e^{-m\bar{\delta}_R T_L} \cdot f_c(i) \quad [5]$$

in cui il termine $e^{-m\bar{\delta}_R T_L}$ esprime l'attenuazione della *DNI* che si verifica in condizione di cielo sereno e $f_c(i)$ dà conto della presenza delle nubi. L'influenza della lunghezza del cammino della radiazione diretta nell'atmosfera è formalizzata nel termine m – funzione di $\cos\vartheta_z$ – detto massa d'aria relativa. Lo scattering causato dalla presenza dei gas è codificato nel fattore di estinzione di Rayleigh $\bar{\delta}_R$, mediato su tutte le lunghezze d'onda della radiazione incidente e di cui sono disponibili espressioni in funzione della sola m . T_L è detto fattore di torbidità di Linke ed è legato alla presenza del vapor acqueo e degli aerosol. In condizioni ideali di cielo sereno e vapor acqueo e aerosol assenti (si parla di aria secca e pulita) è $T_L = 1$; invece nelle condizioni reali questi due componenti sono sempre presenti in quantità variabile e inducono un'attenuazione maggiore rispetto al caso secco e pulito, per cui T_L è maggiore di 1; in ogni caso questo termine varia poco sia in termini temporali che spaziali e sono state prodotte tabelle di valori medi mensili per diverse località.

Il cielo sgombro da nubi è etichettato come sereno. In tutti i modelli di cielo sereno proposti, i primi due fattori dell'elenco precedente sono generalmente ben caratterizzati mediante i due parametri della massa d'aria relativa e del fattore di estinzione di Rayleigh. Comunque, anche se serena, l'atmosfera contiene sempre una quantità variabile di umidità e aerosol. A parità di altre condizioni, l'atmosfera 'serena' che attenua di meno la radiazione solare è quella idealmente libera da umidità e aerosol (aria secca e pulita). Per esprimere invece la maggiore attenuazione indotta dall'atmosfera nelle condizioni reali, si fa uso del fattore di torbidità di Linke T_L : posto $T_L = 1$ per l'aria secca e pulita, è tipicamente $T_L = 3$ per aria pulita ma con 'media' umidità e $T_L = 6 \div 8$ per atmosfera molto inquinata. In ogni caso, se si prescinde da anomalie circoscritte, questo termine varia lentamente nel tempo e poco in termini spaziali, per cui sono state prodotte utili tabelle di valori medi mensili per molte località italiane e del mondo.

La descrizione del comportamento dell'atmosfera si completa fornendo anche per la radiazione globale una correlazione analoga a quella appena vista per la radiazione diretta o, in alternativa, precisare il comportamento della radiazione diffusa, in modo che la radiazione globale si ottenga per somma della diretta con la diffusa mediante la [3]. Riferendoci alla radiazione globale, definiamo il coefficiente di trasmissione globale dell'atmosfera K_T come rapporto, sul piano orizzontale, fra la radiazione globale a suolo e quella extraatmosferica:

$$K_T = \frac{\dot{I}}{\dot{I}_o} \quad [6]$$

Anche K_T dipenderà dagli stessi fattori visti per la diretta e in più dalle modalità di diffusione della radiazione solare intercettata dalle molecole presenti in atmosfera (gas, vapore acqueo, aerosol, nubi). Nella situazione ipotetica di assenza di atmosfera, il profilo giornaliero della radiazione solare al suolo su piano orizzontale coinciderebbe con quello extraatmosferico modulato dal termine $\cos\vartheta_z$; come si è visto in precedenza, la presenza dell'atmosfera sottrae potenza alla componente diretta, in parte compensata dal contributo della radiazione diffusa verso il basso. In condizioni di cielo sereno tutto ciò si traduce in un'attenuazione del valore assoluto dell'irradianza globale e nella modifica del profilo più accentuato per valori bassi di $\cos\vartheta_z$ (primo mattino e tardo pomeriggio); se evidenziamo in K_T il fattore attenuativo K_{Tc} dovuto al cielo sereno appena commentato, e quello K_c dovuto al fenomeno altrimenti irregolare della presenza variabile delle nubi:

$$K_T = K_{Tc} K_c \quad [7]$$

potremo scrivere per K_{Tc} un'espressione del tipo:

$$K_{Tc} = B \cos^\alpha \vartheta_z \quad [8]$$

in cui il coefficiente B esprime l'attenuazione complessiva e il termine $\cos^\alpha \vartheta_z$, con l'esponente α , corregge il profilo giornaliero per la diffusione nelle ore vicino ai crepuscoli (solitamente si adotta il valore $\alpha = 0.15$).

Il termine B ha lo stesso significato e funzione del fattore di torbidità di Linke T_L , in quanto dipende dal carico di vapore acqueo e degli aerosol nell'atmosfera serena. Allo stesso modo di T_L può essere correlato ai valori "attuali" dei due componenti appena richiamati, utile soprattutto in applicazioni di previsione dell'irradianza a breve termine (da adesso fino a tre giorni), oppure tabellato per valori medi mensili, località per località, per ricavare valori medi di stime valevoli per lungo periodo.

Il coefficiente K_c dovuto alla presenza delle nubi è detto indice di serenità (clear-sky index). Per l'atmosfera serena dev'essere: $K_c = 1$; per cielo completamente coperto, un valore accettato è $K_c = 0.04$; nelle situazioni intermedie si scriverà in maniera conveniente in funzione di un appropriato indice di copertura nuvolosa:

$$K_c = K_c(i) \quad [9]$$

Come ripetuto più volte, le considerazioni svolte si applicano alle irradianze e senza pregiudizio eccessivo per l'approssimazione dei risultati, anche alle irradiazioni orarie. Riassumendo, l'irradianza (o l'irradiazione oraria) globale orizzontale al suolo si potrà scrivere:

$$I = K_T I_o = I_o B K_c(i) \cos^\alpha \vartheta_z = I_{sc} \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 B K_c(i) \cos^{1+\alpha} \vartheta_z \quad [10]$$

4 Misurazione della DNI e messa a punto del modello

4.1 Descrizione della centralina di acquisizione-dati solarimetrica

La stazione solarimetrica, prodotta dalla EKO Instruments, è dotata di tre sensori – un pireliometro e due piranometri – per la misura indipendente delle grandezze fondamentali ai fini della caratterizzazione della radiazione solare al suolo:

- l'irradianza globale sul piano orizzontale (acronimo *GHI*, da Global Horizontal Irradiance),
- l'irradianza diffusa sul piano orizzontale (*Dif. HI*) e infine
- l'irradianza diretta sul piano normale ai raggi del Sole (acronimo *DNI*, da Direct Normal Irradiance).

La strumentazione comprende anche un inseguitore, ossia un dispositivo con parti in movimento che rileva istante per istante la posizione del Sole e permette il puntamento della strumentazione nella direzione del disco solare.

La *GHI* è misurata per mezzo di un piranometro costituito da una termopila le cui giunzioni calde sono esposte ai raggi solari, mentre quelle fredde sono schermate dalla radiazione stessa: la tensione prodotta dalla termopila sarà pertanto proporzionale alla radiazione incidente. Dovendo raccogliere la radiazione proveniente da un emisfero, la parte esposta del sensore è isolata e protetta da due semisfere di quarzo; inoltre, il sensore stesso è disposto parallelamente al piano orizzontale, affinché vi incida proprio la radiazione solare proveniente dall'intera volta celeste soprastante.

Per la misura della *Dif. HI* si utilizza un piranometro il cui principio di funzionamento è del tutto identico a quello descritto in precedenza. Poiché in questo caso si deve misurare la sola componente diffusa della radiazione, è indispensabile che il sensore sia schermato dai raggi provenienti direttamente dal disco solare. Ciò è ottenuto interponendo una piccola sfera tra le parti attive del piranometro e il Sole. Una serie di leverismi e la sfera metallica di 5 cm di diametro (shadow-ball assembly), meccanicamente collegati all'inseguitore, svolgono tale funzione.

La *DNI* si misura mediante un pireliometro costituito anch'esso da una termopila. Al fine di considerare solo la radiazione proveniente direttamente dal disco solare, l'elemento sensibile è in questo caso situato ad una estremità di un cilindro metallico, con rivestimento interno assorbente; in corrispondenza dell'altra estremità, quella rivolta al Sole, è situata invece una finestra di quarzo che isola il sistema dall'esterno. Il cilindro (pireliometro) dev'essere costantemente puntato nella direzione di provenienza dei raggi affinché

sul sensore incida solo la radiazione proveniente dal disco solare: per questo motivo, esso è montato direttamente sull'inseguitore.

L'inseguitore solare (solar tracker), mostrato in Figura 2, è sicuramente l'elemento più critico della stazione di misura. Infatti esso è un organo in movimento che assolve al duplice compito di schermare, come già spiegato, mediante una sfera metallica nera opportunamente orientata, il sensore di radiazione diffusa sul piano orizzontale, e di comandare il puntamento del pireliometro per la *DNI* verso il disco solare. Pertanto, all'inseguitore è richiesta una notevole precisione e un'estrema affidabilità, per limitare al minimo i periodi di non allineamento, nei quali tutte le grandezze misurate sarebbero falsate.

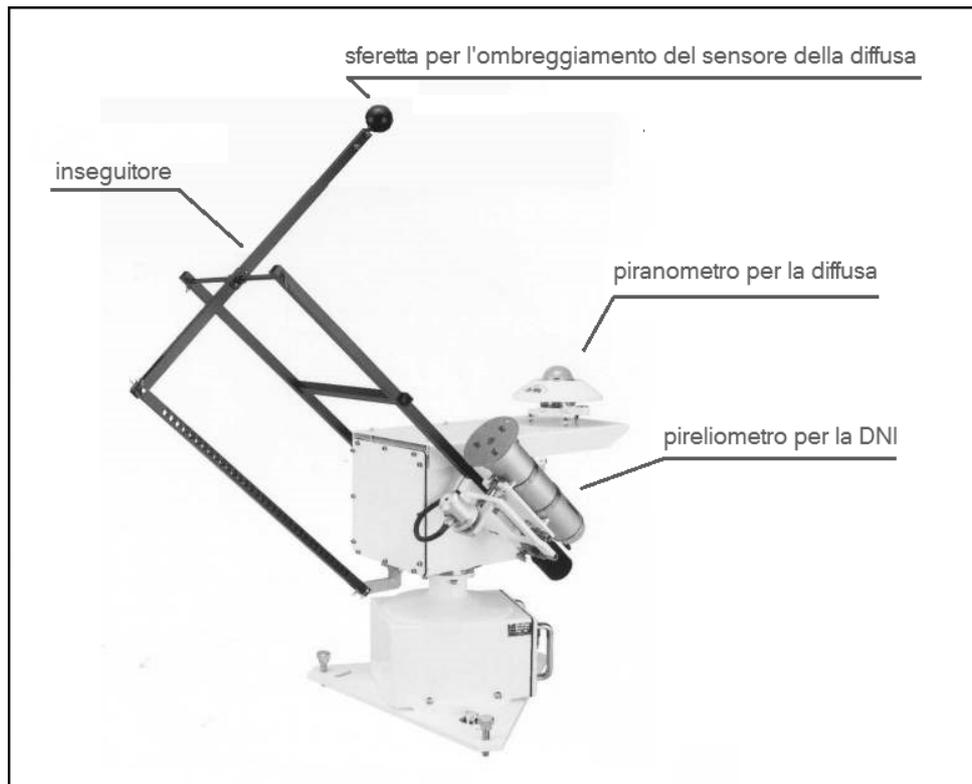


Figura 2 – Stazione solarimetrica. Particolari dell'inseguitore solare (solar tracker) e di due solarimetri (per la DNI e la diffusa orizzontale).

Il sistema si orienta automaticamente sul disco solare durante il suo percorso, giornaliero e stagionale, sulla volta celeste. Poiché il puntamento dev'essere garantito sia in presenza che in assenza di nuvole, l'inseguitore solare è programmato per orientarsi verso la posizione del Sole calcolata a partire dall'ora, dal giorno e dalla posizione geografica del sito (latitudine e longitudine). Al fine di garantire un più affidabile puntamento, il solar tracker è dotato di un sistema di orientamento a catena chiusa, basato su fotocellule, che interviene qualora la radiazione diretta sia superiore ad una certa soglia (cielo sereno). In tal modo piccoli errori di impostazione o di orientazione dell'inseguitore sono compensati dal sistema di controreazione automatico.

La stazione è dotata infine di un sistema automatico di acquisizione dati (*CR-1000* prodotto da *Campbell Scientific*) che memorizza il valor medio e gli scarti quadratici medi di ogni grandezza a partire dai dati misurati nei 5 minuti precedenti (Figura 3). Tutti i dati sono registrati su di un modulo di memoria interno (*MS-716 Campbell Scientific*) in grado di contenere i dati acquisiti per un tempo di alcuni mesi.



Figura 3 – Stazione solarimetrica montata presso il centro ENEA Casaccia ed. F83.

5 Analisi dei dati e sviluppo dei modelli

La centralina è stata programmata per effettuare una misurazione al minuto delle tre grandezze *DNI*, *GHI* e *Dif. HI*, mentre la registrazione dei dati è stata impostata sulla frequenza di un record ogni cinque minuti. In particolare, ogni cinque minuti sono stati registrati, per ciascuna delle tre irradianze, la media e lo scarto quadratico medio (*s.q.m.*) delle cinque misure effettuate nell'intervallo. Ai fini della costruzione del modello di stima della *DNI* a partire dalla *GHI* sono state ovviamente utilizzate solo le medie, mentre gli *s.q.m.* – esprimendo essenzialmente il grado della variabilità nel (breve) tempo fra una registrazione e l'altra delle grandezze misurate – sono stati utilizzati per solo controllare (ed eventualmente scartare) quei valori medi che apparivano inverosimili: tipicamente, i valori negativi per condizioni di illuminazione chiaramente diurna (valori inferiori a zero, purché di poco, sono giustificati a causa dell'imprecisione inevitabile degli strumenti di misura solo per gli istanti notturni o per quelli a ridosso dei crepuscoli dell'alba e del tramonto). Tutti i valori d'irradianza registrati sono espressi in W/m^2 .

Come già accennato, la centralina di acquisizione meteo è stata programmata per registrare le misure delle irradianze diretta normale I_{bn} , globale orizzontale I e diffusa orizzontale I_d ; in realtà le tre grandezze sono legate dalla relazione:

$$I = I_{bn} \cos \vartheta_z + I_d \quad [11]$$

per cui ciascuna di esse può essere calcolata a partire dalle restanti due. La disponibilità delle tre misure rende pertanto possibile il controllo sulla correttezza delle singole misurazioni. Nell'equazione precedente, ϑ_z è l'angolo (detto zenitale) che la direzione di provenienza dei raggi solari forma con la normale al piano

orizzontale della località; per definizione, esso è complementare all'elevazione solare e varia con continuità nel corso della giornata a causa del movimento del Sole sulla volta celeste. Fissati posizione della località (latitudine e longitudine) e giorno dell'anno, l'angolo zenitale si calcola in funzione dell'ora del giorno, per cui la conoscenza esatta dell'istante di acquisizione è essenziale per l'applicazione della equazione [11].

Il prodotto della *DNI* (I_{bn}) per il coseno dell'angolo zenitale non è altro che l'irradianza diretta, riferita non già al piano normale bensì a quello orizzontale, per la quale nel testo si utilizzerà il simbolo I_b :

$$I_b = I_{bn} \cos \vartheta_z \quad [12]$$

L'equazione prima indicata si traduce allora nella seguente relazione fra le tre irradianze globale, diretta e diffusa, tutte riferite alla giacitura orizzontale¹:

$$I = I_b + I_d \quad [13]$$

In alternativa, l'equazione [11] può essere usata per controllare l'impostazione dell'ora con cui il datalogger della centralina solarimetrica marca le registrazioni delle misure. Il controllo si effettua confrontando per ciascun record le due quantità seguenti:

$(I_{bn})_{mis}$ ossia la *DNI* così come risulta dalla misura;

$(I_{bn})_{calc} = \frac{I - I_d}{\cos \vartheta_z}$ ossia la *DNI* calcolata a partire dalle misure della *GHI* (I) e della *Dif. HI* (I_d).

Poiché l'angolo zenitale dipende dal tempo, l'eventuale registrazione errata dell'ora di acquisizione renderebbe il valore calcolato della *DNI* manifestamente discosto da quello misurato. Va precisato che in tutte le formule che coinvolgono i parametri astronomici, compreso l'angolo zenitale, è necessario ricorrere all'ora (o tempo) solare vera, la quale differisce dall'ora media utilizzata negli orologi che regolano per convenzione la vita umana e, ovviamente, anche nella registrazione delle misure. L'ora solare si computa stabilendo come istante di mezzogiorno – ovvero le 12:00:00 – il momento in cui il Sole transita nel piano meridiano della località. Il passaggio fra i due riferimenti orari (medio e solare vero) deve tener conto sia della scostamento temporale dovuto alla differenza di latitudine fra il meridiano della località in esame e quello del fuso orario preso a riferimento, sia della circostanza che il Sole attraversa il piano meridiano di una data località a intervalli variabili da un giorno all'altro e dunque, non esattamente uguali a 24 ore. La formula che lega l'ora solare vera e quella media è pertanto la seguente:

$$t_s = t_{GMT} + \xi \lambda + E_t \quad [14]$$

in cui:

¹ Nel testo ci si attiene alla seguente convenzione riguardo alla scelta dei simboli per le irradianze: tutte sono indicate con la lettera maiuscola I e l'eventuale apposizione di pedici serve poi a distinguerne il tipo (globale, diretta, diffusa o extra-atmosferica) e la giacitura a cui sono riferite (orizzontale o normale). In particolare, nessun pedice è usato quando ci si riferisce all'irraggiamento globale o al piano orizzontale; il pedice ' b ' sta invece per irraggiamento diretto (da $b = beam$), ' d ' per diffuso, ' o ' per extra-atmosferico e, infine, ' n ' per normale. Così, ad esempio, il simbolo I , privo di qualunque pedice, sta per l'irradianza globale orizzontale (*GHI*), I_b per l'irradianza diretta orizzontale, I_{bn} per l'irradianza diretta (su piano) normale (*DNI*) e I_{on} per quella extra-atmosferica normale.

- t_{GMT} è il tempo medio di Greenwich (*GMT*); il GMT è in ritardo di un'ora esatta rispetto al fuso orario adottato invece per l'Europa Centrale (*Central European Time, CET*), in cui è compresa l'Italia;
- λ è la longitudine, riferita a Greenwich, positiva se la località è a Est. Per la Casaccia è: $\lambda = 12.18^\circ$
- ζ è il fattore di conversione fra longitudini (angoli) e tempi, in base all'equivalenza: $360^\circ \equiv 2\pi \equiv 24h$
- E_t è la correzione – detta equazione del tempo – che tiene conto degli anticipi e ritardi dei passaggi del Sole dal piano meridiano. E_t varia nel corso dell'anno fra -15 e +15 minuti circa.

5.1 Validazione dei dati di misura

Prima che siano utilizzati per qualunque scopo, un insieme di dati di misura dev'essere validato. Una buona progettazione ed esecuzione delle misurazioni permette certamente di eliminare la maggior parte delle fonti di errori sistematici, ma a questi ultimi si aggiungono inevitabilmente quelli casuali, i quali, essendo intimamente connessi al processo stesso della misurazione, non sono mai del tutto eliminabili preventivamente. La validazione dei dati acquisiti ha pertanto lo scopo d'individuare quei valori che risultassero errati ed escluderli dall'elaborazione successiva.

Nel nostro caso i criteri di validazione imposti sono i seguenti:

- a. $0 < I < I_o$
- b. $0 < I_d \leq 0.8 I_o$
- c. $I - I_b \leq 0.8 I_o$
- d. $0 \leq I_{bn} < I_{on}$
- e. $I_d \leq I$
- f. $I_b < I$
- g. $I_b + I_d < I_o$
- h. se: $I > 0.6 I_o$ allora: $I_d \leq 0.8 I$
- i. se: $I > 0.6 I_o$ allora: $I_b \geq 0.2 I$
- j. se: $I_b + I_d > 0.6 I_o$ allora: $I_d \leq 4 I_b$
- k. se: $I < 0.2 I_o$ allora: $I_d \geq 0.9 I$
- l. se: $I < 0.2 I_o$ allora: $I_b \leq 0.1 I$
- m. se: $I_b + I_d < 0.2 I_o$ allora: $9 I_b \leq I_d$
- n. $I_b + I_d = I$

Nelle formule precedenti il significato dei simboli è il seguente:

- I_{on} irradianza extra-atmosferica normale (*ENI*);
- I_o irradianza extra-atmosferica orizzontale (*EHI*);
- I irradianza globale orizzontale (*GHI*): si tratta di quella misurata;
- I_{bn} irradianza diretta normale (*DNI*) – misurata;
- I_d irradianza diffusa orizzontale (*Dif. HI*) – misurata;
- I_b irradianza diretta orizzontale, però calcolata come: $I_b = I_{bn} \cdot \cos\theta_z$;
- θ_z angolo zenitale.

I criteri sopra elencati hanno diversa origine. Alcuni discendono dalla definizione stessa delle grandezze coinvolte: ad esempio, il punto (n) è la riscrittura del legame già visto [13] fra le tre irradianze globale, diretta e diffusa. Altri criteri invece si rifanno a limitazioni fisiche, come ad esempio il punto (a), in base al quale l'irradianza globale al suolo (*GHI*) debba essere sempre inferiore a quella extraatmosferica (entrambe riferite al piano orizzontale). Il criterio (h) traduce la circostanza riscontrata in natura secondo cui quanto più il cielo è sereno (ossia maggiore è il rapporto fra *GHI* e *ENI*), tanto più piccola è – nel computo dell'ammontare globale – la frazione diffusa rispetto alla diretta. I fattori 0.6 e 0.8 sono scelti in base al controllo visivo dei grafici di dispersione e in modo da eliminare la maggior parte delle misure anomale e allo stesso tempo evitare il rischio di scartare misure che risultano accettabili pur trovandosi nella zona di border-line. Il criterio (i) è lo stesso appena visto, ma applicato alla coppia di grandezze (*I*, *I_b*): infatti, poiché *I*, *I_b* e *I_d* sono tutte grandezze misurate, devono essere testate separatamente. Analoga origine è alla base della formulazione dei restanti criteri semi-quantitativi [1].

I test di validazione servono a controllare l'accuratezza (= esattezza) dei dati di misura: dati inesatti, che non superano i test, sono dichiarati errati ed esclusi dall'elaborazione. Nondimeno, dati esatti possono essere imprecisi: infatti, come si è detto, un dato di misura è comunque affetto da una imprecisione la cui entità dipende da diversi fattori: insensibilità dello strumento, disturbi casuali ecc. In teoria, indicato con Δ l'intervallo d'imprecisione ammissibile, una misura *m* è accettabile se cade nell'intervallo di ampiezza Δ centrato sul valore vero *v*:

$$m \in v \pm \frac{\Delta}{2} \quad [15]$$

ma poiché il valore vero *v* non è noto – altrimenti la stessa misurazione sarebbe superflua – si tratterrà di trasformare i precedenti criteri, di volta in volta, in maniera opportuna. Ad esempio, la condizione (e):

$$I_d \leq I \quad [16]$$

si traduce in:

$$I_d - \frac{\Delta I_d}{2} \leq I + \frac{\Delta I}{2} \quad [17]$$

dove ΔI_d e ΔI sono rispettivamente gli intervalli d'imprecisione ammessi per le irradianze orizzontali diffusa e globale, da stabilire a priori. La Figura 4 illustra graficamente il criterio appena esposto.

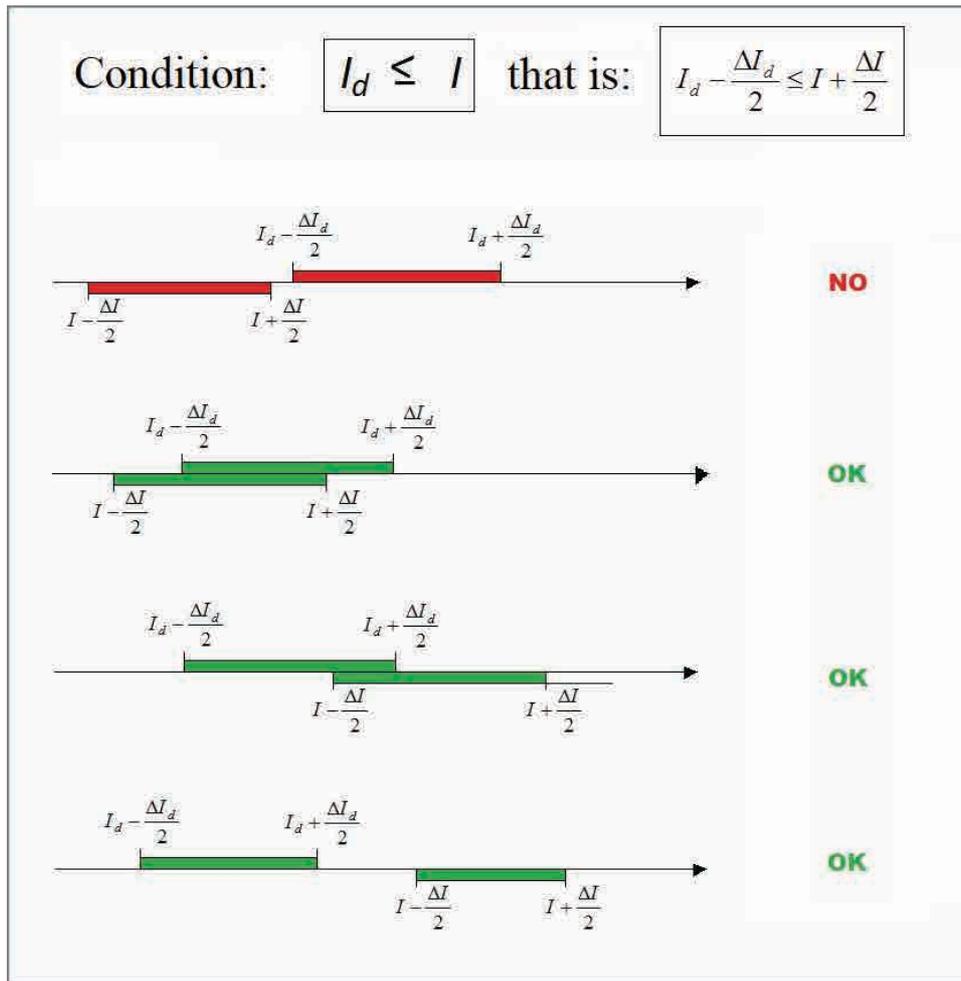


Figura 4 – Esempio di criterio di validazione delle misure: $I_d \leq I$. Gli intervalli d’imprecisione per le irradianze orizzontali globale e diffusa sono rispettivamente $I \pm \Delta I/2$ e $I_d \pm \Delta I_d/2$. Con riferimento alle possibili posizioni reciproche, si dànno pertanto quattro casi, di cui solo il primo è incompatibile con il criterio $I_d \leq I$; gli altri tre si traducono collettivamente nella condizione: $I_d - (\Delta I_d/2) \leq I + (\Delta I/2)$.

Come ulteriore esempio, il criterio $I = I_b + I_d$, che trattandosi di un’uguaglianza non potrà essere mai essere esattamente verificata con valori provenienti da misure, si traduce nella richiesta che siano congiuntamente soddisfatte le due disuguaglianze seguenti:

$$\left(I_{bn} - \frac{\Delta I_{bn}}{2} \right) \cos \vartheta_z + \left(I_d - \frac{\Delta I_d}{2} \right) \leq \left(I + \frac{\Delta I}{2} \right)$$

$$\left(I_{bn} + \frac{\Delta I_{bn}}{2} \right) \cos \vartheta_z + \left(I_d + \frac{\Delta I_d}{2} \right) \geq \left(I - \frac{\Delta I}{2} \right)$$

[18]

Restano da stabilire le ampiezze per le imprecisioni ammissibili nei test. Poiché nelle misure d’irradianza notturne, che teoricamente dovrebbero essere nulle, si riscontrano valori, quasi, sempre compresi fra $-10W/m^2$ e $+10W/m^2$, appare ragionevole assumere il seguente intervallo:

$$\Delta I = \Delta I_{bn} = \Delta I_d = 20 \text{ W/m}^2 \quad [19]$$

uguale per tutte e tre le irradianze.

5.2 Correlazione DNI = f (GHI)

In letteratura sono attestate numerose correlazioni fra le diverse componenti della radiazione, stabilite in diverse epoche, per diverse aree geografiche, per diverse condizioni meteo e climatiche e – infine – per diversi intervalli di tempo (orari, giornalieri ecc.) dove uno dai autori più citati sono: Erbs [2], Liu e Jordan [3], Collaires-Pereira e Rabl [4], Iqbal [5], Reindl et.al. [6] etc. Storicamente, la più studiata è la dipendenza della frazione diffusa k dal coefficiente di trasmissione globale K_T :

$$k = f(K_T) \quad [20]$$

Il coefficiente di trasmissione globale dell'atmosfera è definito dal rapporto fra l'irradianza globale al suolo e quella extraatmosferica, entrambe riferite al piano orizzontale:

$$K_T = \frac{I}{I_o} = \frac{GHI}{EHI} \quad [21]$$

mentre la frazione della radiazione diffusa orizzontale rispetto alla globale è data dal rapporto:

$$k = \frac{I_d}{I} = \frac{D_{iff} HI}{GHI} \quad [22]$$

Nel nostro caso, il coefficiente di trasmissione per la diretta normale K_{bn} – che interessa in primo luogo per il calcolo della DNI:

$$K_{bn} = \frac{I_{bn}}{I_{on}} = \frac{DNI}{ENI} \quad [23]$$

si ricaverà da K_T e k mediante la relazione:

$$K_{bn} = K_T(1-k) \quad [24]$$

Un'ottima correlazione $k = f(K_T)$ è quella stabilita da Boland-Ridley [7]:

$$k = \frac{1}{1 + e^{\alpha + \beta K_T}} \quad [25]$$

per una molteplicità di motivi:

- si tratta della curva logistica, adoperata per descrivere molti fenomeni fisici e attività umane, caratterizzati da una fase iniziale di rapida crescita, seguita da una fase di saturazione del fenomeno;

- Boland e Ridley forniscono una giustificazione teorica per l'applicazione ai fenomeni di attenuazione radiativa in atmosfera;
- è elegante e compatta, infatti dipende solo da due parametri: α e β , e si applica in tutto l'intervallo di definizione di K_T (ossia $0 \div 1$) anche se nel corso degli anni sono stati aggiunti altri parametri (fino a 6) [8];
- è versatile: i due parametri α e β si possono stimare di volta in volta per adattare la formula alle differenti situazioni geografiche (si veda più avanti, Figura 5);
- è pratica, perché il rapporto fra DNI e GHI si ricava agevolmente e assume una forma altrettanto compatta:

$$\frac{K_{bn}}{K_T} = \frac{1}{1 + e^{-\alpha - \beta K_T}} \quad [26]$$

A questo punto va segnalato che ci sono due controindicazioni, non trascurabili, al tentativo di ottenere una correlazione diretta fra i due parametri K_T e k o – equivalentemente – fra K_T e K_{bn} :

In primo luogo, il grafico di dispersione delle coppie di valori (K_T, k) mostra una variabilità eccessiva dei dati intorno all'ipotetica curva di correlazione (si veda Figura 5, a sinistra). Ciò è inevitabile se si considera che il fenomeno dell'attenuazione radiativa in atmosfera dipende da troppe altre variabili meteorologiche, tutte imprevedibili e difficilmente misurabili o stimabili, quali l'umidità, il vento, la temperatura ecc. Va detto pure che di solito queste correlazioni sono studiate con i dati medi orari, per i quali la variabilità risulta ovviamente meno accentuata rispetto alle misure adottate in questo studio, effettuate ogni 5 minuti. Le medesime considerazioni appena fatte valgono per il grafico a dispersione che considera la coppia di parametri (K_T, K_{bn}) (Figura 5, al centro).

In secondo luogo, c'è una difficoltà operativa. Di solito la stima dei parametri di regressione si effettua con il metodo dei minimi quadrati e risulta computisticamente agevole se la correlazione proposta è lineare. Pertanto, affinché il metodo possa applicarsi ai parametri α e β , occorre trasformare la [25] in maniera da rendere lineare l'espressione che contiene i parametri da stimare per regressione. Si ottiene:

$$\ln\left(\frac{1}{k} - 1\right) = \alpha + \beta K_T \quad [27]$$

In questo modo però il metodo determina i valori di stima dei parametri che rendono minima l'espressione:

$$\sum_i \left[\ln\left(\frac{1}{k_i} - 1\right) - (\alpha + \beta K_{T,i}) \right]^2 \quad [28]$$

(l'indice i è relativo all'insieme di tutte le misure). Non sempre, però, i valori così definiti sono gli stessi che renderebbero minima la sommatoria che più interessa, ossia:

$$\sum_i \left[k_{i,mis} - k_{i,stima} \right]^2 = \sum_i \left[k_i - \frac{1}{1 + e^{\alpha + \beta K_{T,i}}} \right]^2 \quad [29]$$

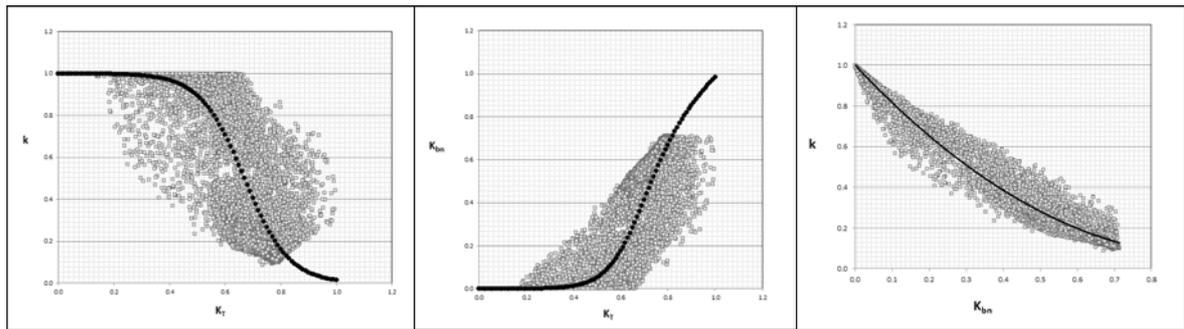


Figura 5 – Tipici grafici a dispersione fra i coefficienti di trasmissione delle irradianze. Il grafico a sinistra mette in relazione la coppia (K_T, k) : i punti rappresentano le misure, la linea nera è una possibile curva d'interpolazione, come ad esempio la curva logistica proposta da Boland-Ridley. Gli altri due grafici a confronto mostrano le dispersioni della coppia (K_T, K_{bn}) [al centro] e (K_{bn}, k) [a destra].

Osservando i diagrammi, si vede invece che quello che mette in relazione i parametri della coppia (K_{bn}, k) si presta meglio allo scopo in quanto i punti di misura si addensano più fortemente su di una curva approssimabile con un polinomio al più di secondo grado, oppure con una potenza. Nel primo caso, il polinomio candidato assume l'aspetto:

$$k = aK_{bn}^2 + bK_{bn} + c \quad [30]$$

In condizioni d'irraggiamento diretto nullo: $K_{bn} = 0$, l'irraggiamento globale è costituito interamente dalla componente diffusa, di conseguenza la frazione diffusa dev'essere unitaria: $k = 1$. Pertanto, nella [30] il termine C è noto a priori e vale 1. Tenendo conto di questa assunzione e utilizzando il metodo dei minimi quadrati, la regressione sulla parabola [30] produce le seguenti stime (Figura 6):

- stima del parametro: $a = 0.98$
- stima del parametro: $b = -2$
- coefficiente di determinazione: $R^2 = 0.96$

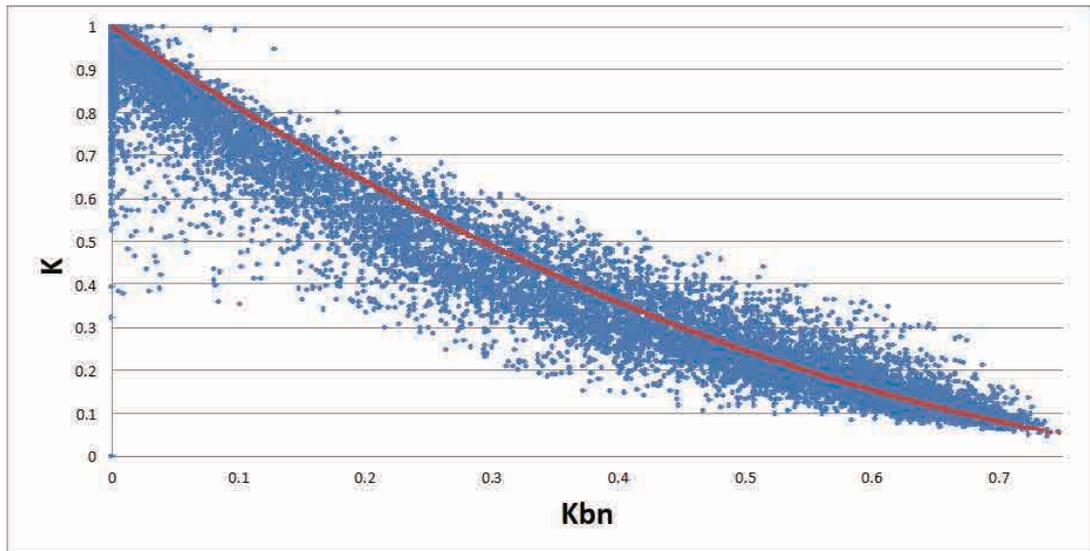


Figura 6 – Grafico a dispersione del coefficiente di trasmissione della diretta normale (K_{bn}) e della frazione della diffusa (k). Nel grafico è disegnata anche la curva d’interpolazione proposta (parabola) e sono riportati i corrispondenti i valori dei parametri stimati per regressione.

Va precisato che poiché lo scopo di questo studio è la ricerca di un legame diretto fra DNI e GHI , i tre parametri coinvolti K_T , K_{bn} e k sono derivati tutti dalle sole misure di DNI e GHI secondo le uguaglianze:

$$K_T = \frac{I_{mis}}{I_o} = \frac{GHI_{mis}}{EHI}$$

$$K_{bn} = \frac{I_{bn,mis}}{I_{on}} = \frac{DNI_{mis}}{ENI} \tag{31}$$

$$k = \frac{I_{mis} - I_{bn,mis} \cdot \cos \vartheta_z}{I_{mis}} = \frac{GHI_{mis} - DNI_{mis} \cdot \cos \vartheta_z}{GHI_{mis}}$$

Non si tiene conto, cioè, nel calcolo di k , delle effettive misure dell’irradianza diffusa:

$$k = \frac{I_{d,mis}}{I_{mis}} = \frac{(D_{diff} HI)_{mis}}{GHI_{mis}} \tag{32}$$

ma, stante il legame [11] fra le tre irradianze I , I_{bn} , e I_d e avendo i dati di misura superato i test di validazione, e in particolare il criterio (n), le due formule possibili per k conducono allo stesso risultato a meno dell’imprecisione ammessa nei dati di misura validati.

Anche tenendo conto del legame [24] che sussiste fra i tre coefficienti di trasmissione K_T , K_{bn} e k , va detto che non vi è la possibilità di ricavare dal modello [30] in maniera univoca l’espressione esplicita per calcolare la DNI a partire dai dati di GHI (invece il viceversa, ossia il calcolo della GHI dalla DNI , si ottiene agevolmente). D’altra parte, non il legame parabolico [30] fra k e K_{bn} , cui qui si è fatto ricorso come mero espediente di calcolo, bensì la formulazione di Boland-Ridley, con le due equazioni [25] e [26], modella al meglio il fenomeno della radiazione solare al suolo e i legami fra i coefficienti di trasmissione che lo descrivono. Perciò, per tradurre la correlazione parabolica [30] nelle formule di Boland-Ridley, occorre

riportare su di un riferimento cartesiano di ascissa K_T e ordinata k , sia la curva $k = f(K_T)$ ottenuta per tabellazione dall'espressione polinomiale (parabolica) [30], sia le curve [25] di Boland-Ridley con differenti coppie di parametri (α, β) ; e stimare poi questi ultimi per regressione. Procedendo in questo modo si ottiene:

$$\alpha = -3.969$$

$$\beta = 7.535 \quad [33]$$

che costituiscono i coefficienti di Boland-Ridley qui cercati. La Figura 7 riporta i grafici definitivi di dispersione fra i tre coefficienti (K_T, K_{bn}, k) e le curve d'interpolazione del modello messo a punto in questo studio.

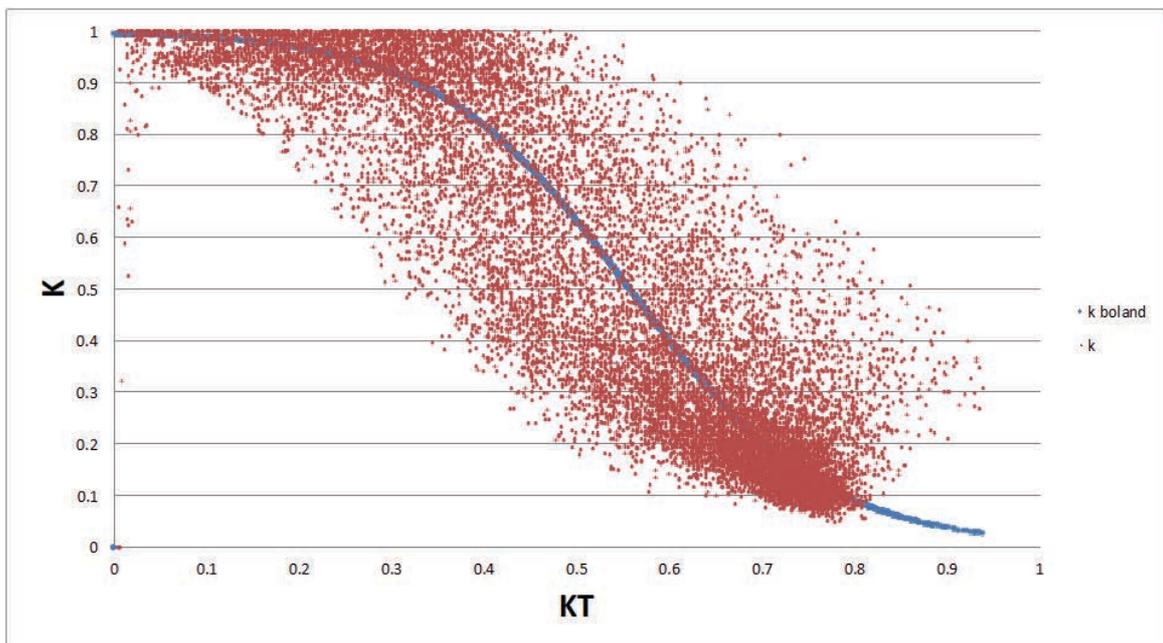


Figura 7 – Grafico a dispersione con le curve d'interpolazione definitive secondo il modello Boland-Ridley. I dati di misura sono rappresentati con punti di colore rosso. Le misure utilizzate sono la GHI e la DNI.

Messo a punto un qualunque modello con un insieme di dati acquisiti mediante misurazione, occorre poi confrontare le misure con le corrispondenti stime e valutare se l'entità degli scostamenti non è tale da invalidare la bontà del modello proposto. A questo scopo sono utili alcuni indicatori statistici. Il primo di questi, detto Men Bias Error (*MBE*), è semplicemente la differenza fra la media delle stime e quella delle misure. Nel nostro caso è:

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{bn,i,s} - I_{bn,i,m}) = 12.26 \text{ W/m}^2 \quad [34a]$$

o, in termini relativi:

$$\frac{MAE}{\bar{I}_{bn,m}} = 0.19 = 19\% \quad [35b]$$

dove è stato indicato con $\bar{I}_{bn,m}$ la media delle misure di *DNI*, che risulta:

$$\bar{I}_{bn,m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{bn,i,m} = 386.7 \text{ W/m}^2 \quad [36c]$$

Un altro indice di scostamento molto usato è il Root Mean Squared Error (*RMSE*) il quale, rispetto al precedente *MAE*, considera i quadrati degli scarti anziché i valori assoluti, ciò al fine di attribuire nella sommatoria un peso maggiore agli scarti più elevati. Abbiamo:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{bn,i,s} - I_{bn,i,m})^2} = 112 \text{ W/m}^2 \quad [37d]$$

Un ultimo indice può ottenersi confrontando i valori medi di *DNI* di tutte le misure e dei corrispondenti valori stimati. Poiché la media delle stime è:

$$\bar{I}_{bn,m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{bn,i,s} = 398.96 \text{ W/m}^2 \quad [38e]$$

si ottiene:

$$\frac{\bar{I}_{bn,m} - \bar{I}_{bn,m}}{\bar{I}_{bn,m}} = \frac{386.7 \text{ W/m}^2 - 398.96 \text{ W/m}^2}{386.7 \text{ W/m}^2} = \frac{-12.26}{386.7} = -0.031 = -3.1\% \quad [39f]$$

Ovviamente, i valori degli indicatori appena riportati risentono della complessità della fenomenologia della radiazione solare al suolo nelle sue varie componenti. Come già evidenziato sopra, essa dipende da numerosi fattori meteorologici contingenti e di difficile acquisizione ai fini della messa a punto dei modelli.

6 Previsione a 24h e 48h della *DNI*

Messo a punto il modello $DNI = f(GHI)$ per la previsione della *DNI* si parte dal modello di previsione della *GHI* a 24 e 48 ore sviluppato nel PT 2019-21 nella linea di attività L.1.25: Elaborazioni di dati e indici climatici per le valutazioni energetiche e la previsione della producibilità da fonti rinnovabili-parte III [9].

Di seguito vengono riportati i risultati per l'anno 2020 a 24h.

6.1 Gennaio 2020 24h

Giorni	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%	Tipo cielo
1	6004.3	5772.3	24.17	5.30	9.66	SERENO
2	6007.8	5780.7	29.97	5.16	11.97	SERENO
3	5264.9	5790.1	42.91	10.67	19.56	SERENO
4	881.3	2804.5	160.75	218.22	437.74	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	6283.0	5811.5	40.55	8.54	15.49	SERENO
6	6525.2	5823.5	55.81	10.95	20.53	SERENO
7	2948.8	3409.7	67.70	28.68	55.10	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	6179.0	5850.1	33.01	6.25	12.82	SERENO
9	6239.5	5864.6	35.37	7.31	13.61	SERENO
10	1955.4	3238.9	123.40	73.96	151.46	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	5992.9	6131.5	17.45	3.40	6.99	SERENO
12	5970.7	6150.3	21.20	3.17	8.52	SERENO
13	2944.2	4567.0	128.48	55.12	104.73	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	4541.4	4609.7	222.29	56.09	117.48	PARZIALMENTE NUVOLOSO
15	6149.3	6211.5	22.39	4.58	8.74	SERENO
16	4504.2	4566.6	63.05	15.15	33.60	SERENO
17	4620.0	5465.9	94.71	21.43	49.20	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	299.3	242.6	29.35	113.41	235.34	NUVOLOSO
19	5041.6	4605.7	81.93	17.29	39.00	SERENO
20	88.7	4310.4	321.00	4758.72	8684.06	NUVOLOSO
21	3753.8	3572.6	83.71	28.64	53.52	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	5865.6	5492.8	55.14	9.90	22.56	SERENO
23	5743.2	6160.5	38.84	9.16	16.23	SERENO
24	541.7	1989.2	144.26	333.97	639.11	NUVOLOSO
25	931.9	156.9	83.59	85.91	215.30	PARZIALMENTE NUVOLOSO
26	794.1	442.5	49.53	66.74	149.69	PARZIALMENTE NUVOLOSO
27	4494.8	4986.1	90.92	22.23	48.55	PARZIALMENTE NUVOLOSO
28	0.4	176.8	12.42	46850.73	79149.50	NUVOLOSO
29	1381.4	4453.6	216.78	222.41	376.64	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	5864.5	5872.3	77.79	17.68	31.84	SERENO
31	1.1	1597.5	126.67	141067.45	268646.18	NUVOLOSO

Tabella 1.

Giorni Sereni KT>0.65	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%
1	6004.3	5772.3	24.17	5.30	9.66
2	6007.8	5780.7	29.97	5.16	11.97
3	5264.9	5790.1	42.91	10.67	19.56
5	6283.0	5811.5	40.55	8.54	15.49
6	6525.2	5823.5	55.81	10.95	20.53
8	6179.0	5850.1	33.01	6.25	12.82
9	6239.5	5864.6	35.37	7.31	13.61
11	5992.9	6131.5	17.45	3.40	6.99
12	5970.7	6150.3	21.20	3.17	8.52
15	6149.3	6211.5	22.39	4.58	8.74
16	4504.2	4566.6	63.05	15.15	33.60
19	5041.6	4605.7	81.93	17.29	39.00
22	5865.6	5492.8	55.14	9.90	22.56
23	5743.2	6160.5	38.84	9.16	16.23
30	5864.5	5872.3	77.79	17.68	31.84
	87635.8	85883.9			
		1.02			

Tabella 2.

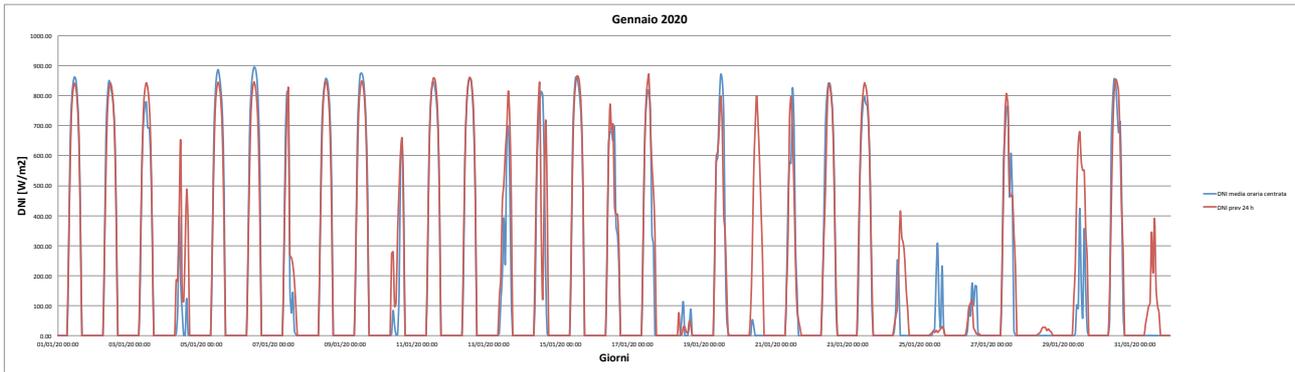


Figura 8.

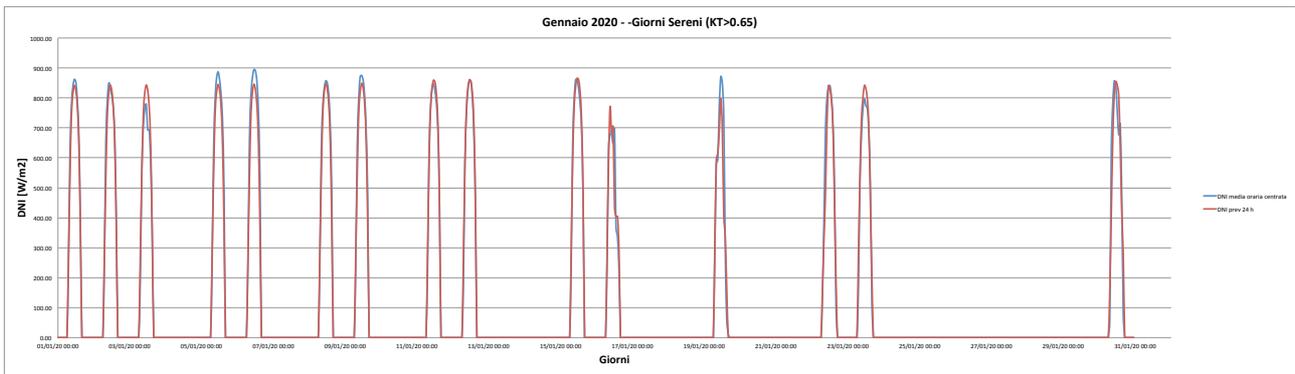


Figura 9.

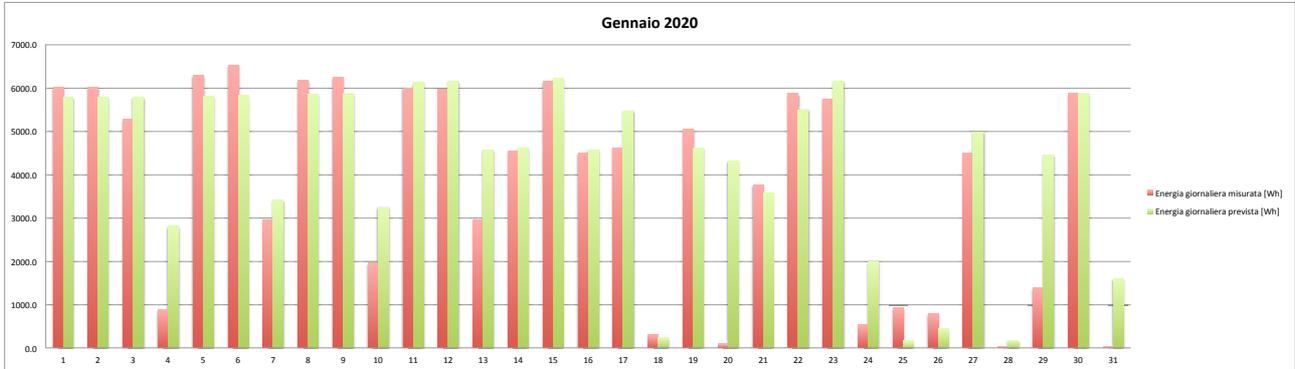


Figura 10.

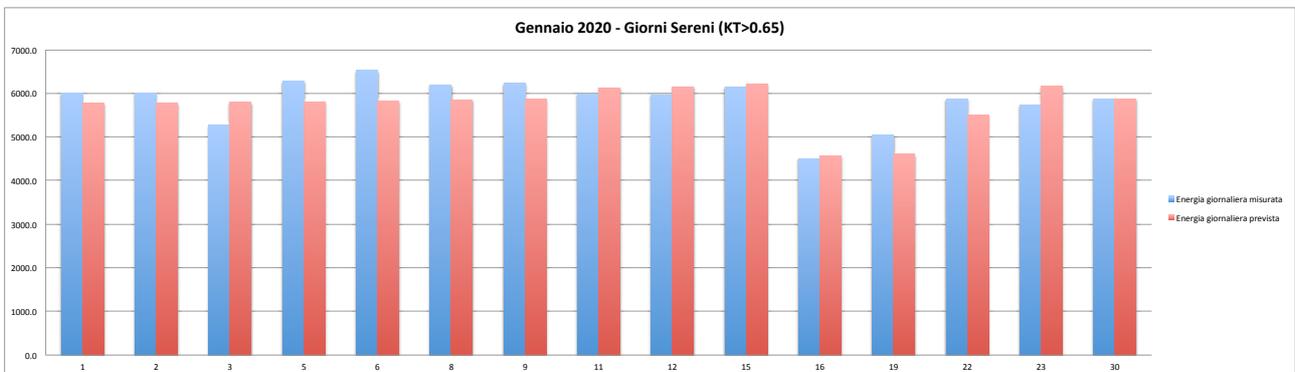


Figura 11.

6.2 Febbraio 2020 24h

Giorni	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%	Tipo cielo
1	1.5	147.6	10.00	9976.73	16384.85	NUVOLOSO
2	597.8	3224.8	269.17	439.44	1080.63	NUVOLOSO
3	1890.7	6308.3	306.60	233.65	389.19	PARZIALMENTE NUVOLOSO
4	2313.0	2608.8	214.24	98.66	222.31	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	6819.9	6871.2	109.10	20.37	38.39	SERENO
6	7896.5	6899.1	79.52	12.63	24.17	SERENO
7	7980.6	6926.7	88.27	13.21	26.55	SERENO
8	7663.4	6954.2	64.01	10.11	20.05	SERENO
9	2408.3	3832.9	254.84	128.13	253.96	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	2232.7	5300.0	269.62	161.82	289.82	PARZIALMENTE NUVOLOSO
12	5962.4	7296.0	89.13	22.37	35.88	SERENO
13	1857.0	3494.5	217.08	156.17	280.55	PARZIALMENTE NUVOLOSO
15	7645.7	6935.3	61.77	9.29	19.39	SERENO
16	7706.6	7414.1	48.59	6.33	15.13	SERENO
17	6716.9	5705.8	91.36	17.02	32.64	SERENO
18	5161.9	6672.8	159.90	32.94	74.34	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	812.0	4633.2	396.86	649.13	1172.99	NUVOLOSO
20	8435.1	7525.4	81.79	10.78	23.27	SERENO
21	7093.9	8007.3	95.97	15.05	32.47	SERENO
22	7125.6	7804.8	64.28	13.49	21.65	SERENO
23	4158.8	7644.1	252.71	83.81	145.84	PARZIALMENTE NUVOLOSO
24	5756.0	7576.7	183.27	32.44	76.42	SERENO
25	3101.7	3447.2	150.57	52.49	116.51	PARZIALMENTE NUVOLOSO
26	4472.3	6257.0	261.60	58.12	140.39	PARZIALMENTE NUVOLOSO
27	6841.3	8339.1	203.55	29.07	71.41	SERENO
28	8643.9	8392.8	37.94	6.23	10.53	SERENO
29	3357.3	5639.5	242.82	92.52	173.58	PARZIALMENTE NUVOLOSO
	134652.5	161859.3				
		0.83				

Tabella 3.

Giorni Sereni KT>0.65	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%
5	6819.9	6871.2	109.1	20.4	38.4
6	7896.5	6899.1	79.5	12.6	24.2
7	7980.6	6926.7	88.3	13.2	26.5
8	7663.4	6954.2	64.0	10.1	20.0
12	5962.4	7296.0	89.1	22.4	35.9
15	7645.7	6935.3	61.8	9.3	19.4
16	7706.6	7414.1	48.6	6.3	15.1
17	6716.9	5705.8	91.4	17.0	32.6
20	8435.1	7525.4	81.8	10.8	23.3
21	7093.9	8007.3	96.0	15.1	32.5
22	7125.6	7804.8	64.3	13.5	21.7
24	5756.0	7576.7	183.3	32.4	76.4
27	6841.3	8339.1	203.6	29.1	71.4
28	8643.9	8392.8	37.9	6.2	10.5
	102287.6	102648.7			
		1.00			

Tabella 4.



Figura 12.



Figura 13.

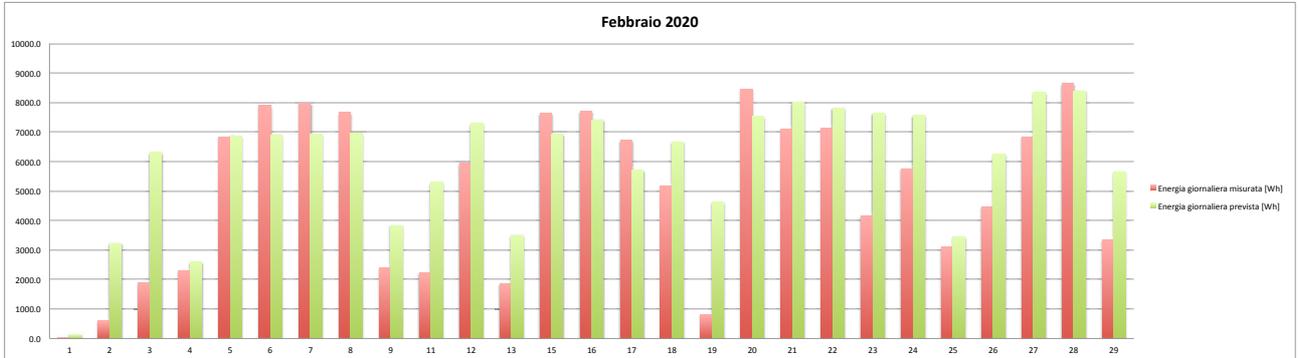


Figura 14.

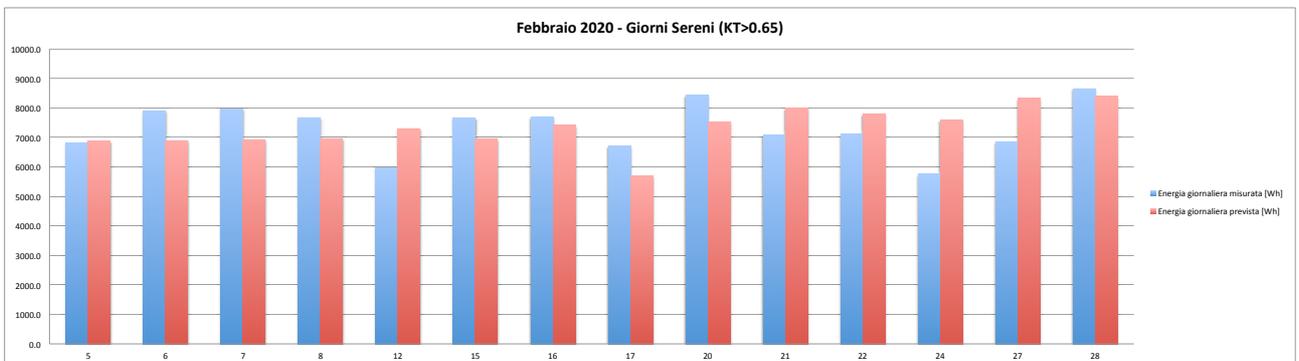


Figura 15.

6.3 Marzo 2020 24h

Giorni	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%	Tipo cielo
1	3.5	209.2	29.68	5812.05	20128.17	NUVOLOSO
2	322.5	1182.6	109.89	366.80	817.77	NUVOLOSO
3	1152.3	4780.0	301.33	328.16	627.62	PARZIALMENTE NUVOLOSO
4	6252.0	5413.6	211.42	32.00	81.16	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	2273.9	6599.6	354.49	193.70	374.14	PARZIALMENTE NUVOLOSO
6	2436.8	2812.8	298.77	155.76	294.26	PARZIALMENTE NUVOLOSO
7	4999.2	2349.6	273.24	74.68	131.18	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	8280.6	7889.7	68.16	12.21	19.76	SERENO
9	2777.3	3783.4	154.90	75.03	133.86	PARZIALMENTE NUVOLOSO
10	6792.4	5401.2	200.54	36.91	70.86	SERENO
11	8885.9	8163.4	47.50	8.13	12.83	SERENO
12	3152.6	7446.1	316.97	154.41	241.31	PARZIALMENTE NUVOLOSO
13	15.1	6934.9	433.65	45760.97	68826.18	NUVOLOSO
14	46.3	1625.1	154.11	3411.60	7991.93	NUVOLOSO
15	8304.7	8360.4	59.12	7.41	17.09	SERENO
16	8583.8	8406.4	16.31	3.11	4.56	SERENO
17	1548.1	7236.2	369.42	367.41	572.69	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	7528.1	7012.5	121.38	20.74	38.70	SERENO
19	8434.2	8539.1	15.63	2.39	4.45	SERENO
20	7378.7	8581.7	91.30	16.30	29.70	SERENO
21	4057.8	8581.5	298.95	111.48	176.82	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	3547.6	4416.0	314.58	130.91	212.81	PARZIALMENTE NUVOLOSO
23	8974.7	8654.2	53.52	9.06	14.31	SERENO
24	9138.8	8689.5	35.77	5.65	9.39	SERENO
25	6900.5	7967.7	148.41	26.97	51.62	SERENO
26	10.9	119.4	7.30	999.02	1611.24	NUVOLOSO
27	2856.1	1905.3	226.46	103.01	190.30	PARZIALMENTE NUVOLOSO
28	542.8	2637.6	282.42	492.94	1248.77	PARZIALMENTE NUVOLOSO
29	4744.6	7535.6	252.08	82.41	127.51	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	4538.9	8886.8	273.09	95.79	144.40	PARZIALMENTE NUVOLOSO
31	4898.4	5211.4	180.98	49.56	88.67	PARZIALMENTE NUVOLOSO
	139378.9	177332.5				
		0.79				

Tabella 5.

Giorni Sereni KT>0.65	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%
8	8280.6	7889.7	68.2	12.2	19.8
10	6792.4	5401.2	200.5	36.9	70.9
11	8885.9	8163.4	47.5	8.1	12.8
15	8304.7	8360.4	59.1	7.4	17.1
16	8583.8	8406.4	16.3	3.1	4.6
18	7528.1	7012.5	121.4	20.7	38.7
19	8434.2	8539.1	15.6	2.4	4.4
20	7378.7	8581.7	91.3	16.3	29.7
23	8974.7	8654.2	53.5	9.1	14.3
24	9138.8	8689.5	35.8	5.7	9.4
25	6900.5	7967.7	148.4	27.0	51.6
	89202.4	87665.7			
		1.02			

Tabella 6.

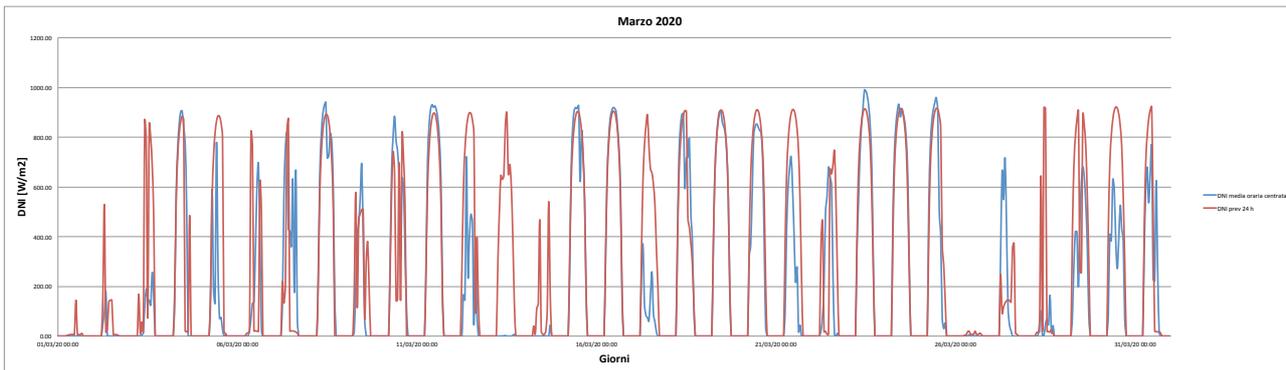


Figura 16.

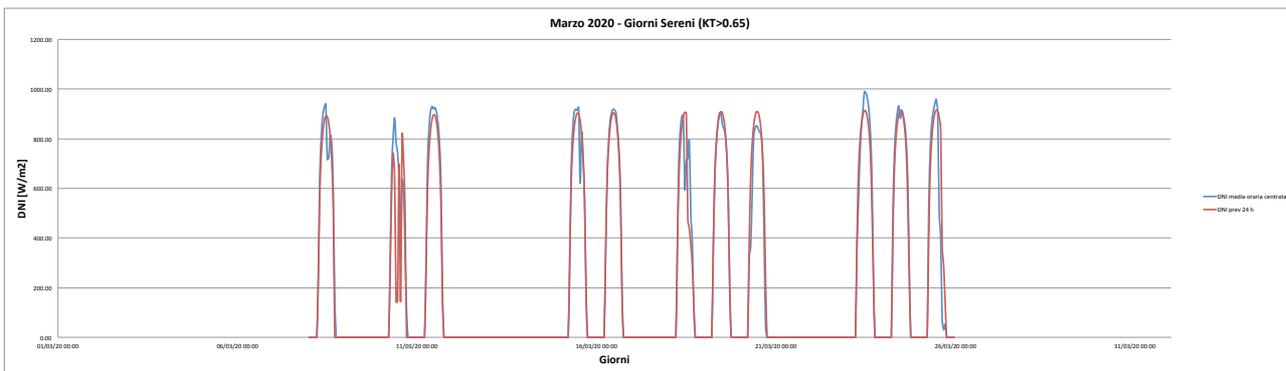


Figura 17.



Figura 18.



Figura 19.

6.4 Aprile 2020 24h

Giorni	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%	Tipo cielo
1	9722.8	8608.5	67.54	11.46	16.67	SERENO
2	8806.7	6981.1	152.20	22.02	41.48	SERENO
3	9324.0	8690.7	39.12	7.16	10.07	SERENO
4	9039.2	8730.6	24.72	3.56	6.56	SERENO
5	7366.7	8643.4	101.04	17.78	32.92	SERENO
6	7816.9	8806.6	64.06	12.66	19.67	SERENO
7	8665.8	8845.7	19.10	2.88	5.29	SERENO
8	7979.5	8883.8	54.54	11.33	16.41	SERENO
9	8696.0	8918.8	22.18	3.37	6.12	SERENO
10	9175.0	8952.1	16.83	2.90	4.40	SERENO
11	9085.8	9011.2	19.70	2.99	5.20	SERENO
12	7733.5	9048.4	91.30	17.00	28.33	SERENO
13	2667.4	6679.0	290.31	150.40	261.21	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	456.5	1651.6	149.70	268.62	786.95	NUVOLOSO
15	10146.2	9155.9	62.10	9.76	14.69	SERENO
16	7924.1	7506.1	107.23	19.17	32.48	SERENO
17	5827.9	8790.7	186.69	50.84	76.88	SERENO
18	2029.6	6968.6	338.97	243.35	400.84	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	1055.4	4623.5	267.20	355.77	607.62	PARZIALMENTE NUVOLOSO
20	3.8	109.5	7.44	2766.37	4673.68	NUVOLOSO
21	338.2	727.1	75.36	255.65	534.83	NUVOLOSO
22	4.0	109.0	6.67	2659.75	4053.36	NUVOLOSO
23	5928.8	5544.3	294.64	70.85	119.27	PARZIALMENTE NUVOLOSO
24	8667.0	8935.9	77.33	11.18	21.41	SERENO
25	8116.0	8952.3	159.58	22.46	47.19	SERENO
26	10013.4	8632.9	115.98	14.78	27.80	SERENO
27	10034.5	8983.7	79.15	12.55	18.93	SERENO
28	1906.6	3140.7	204.79	130.11	257.79	PARZIALMENTE NUVOLOSO
29	4114.6	6159.0	241.07	93.42	140.61	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	5715.4	6201.0	117.86	27.31	49.49	PARZIALMENTE NUVOLOSO
	188361.2	206992.0				
		0.91				

Tabella 7.

Giorni Sereni KT>0.65	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%
1	9722.8	8608.5	67.5	11.5	16.7
2	8806.7	6981.1	152.2	22.0	41.5
3	9324.0	8690.7	39.1	7.2	10.1
4	9039.2	8730.6	24.7	3.6	6.6
5	7366.7	8643.4	101.0	17.8	32.9
6	7816.9	8806.6	64.1	12.7	19.7
7	8665.8	8845.7	19.1	2.9	5.3
8	7979.5	8883.8	54.5	11.3	16.4
9	8696.0	8918.8	22.2	3.4	6.1
10	9175.0	8952.1	16.8	2.9	4.4
11	9085.8	9011.2	19.7	3.0	5.2
12	7733.5	9048.4	91.3	17.0	28.3
15	10146.2	9155.9	62.1	9.8	14.7
16	7924.1	7506.1	107.2	19.2	32.5
17	5827.9	8790.7	186.7	50.8	76.9
24	8667.0	8935.9	77.3	11.2	21.4
25	8116.0	8952.3	159.6	22.5	47.2
26	10013.4	8632.9	116.0	14.8	27.8
27	10034.5	8983.7	79.2	12.5	18.9
	164141.1	165078.8			
		0.99			

Tabella 8.

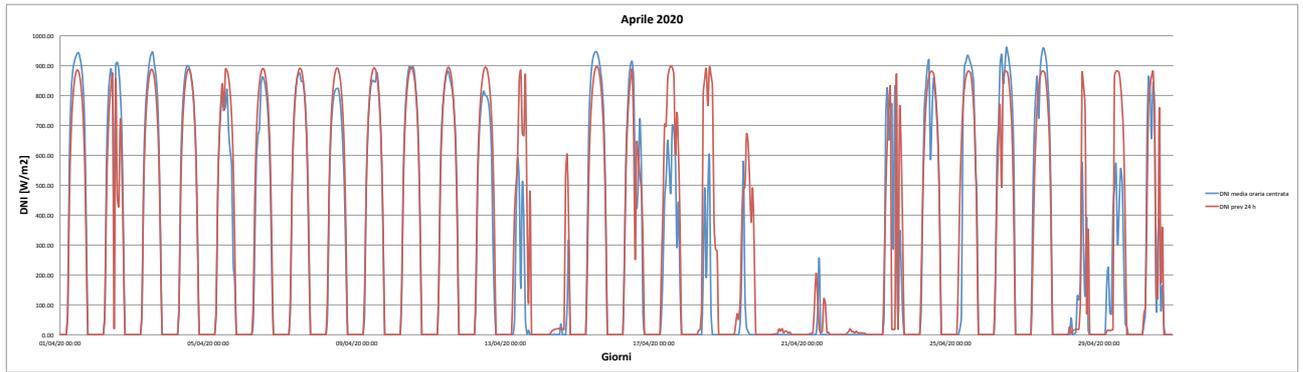


Figura 20.

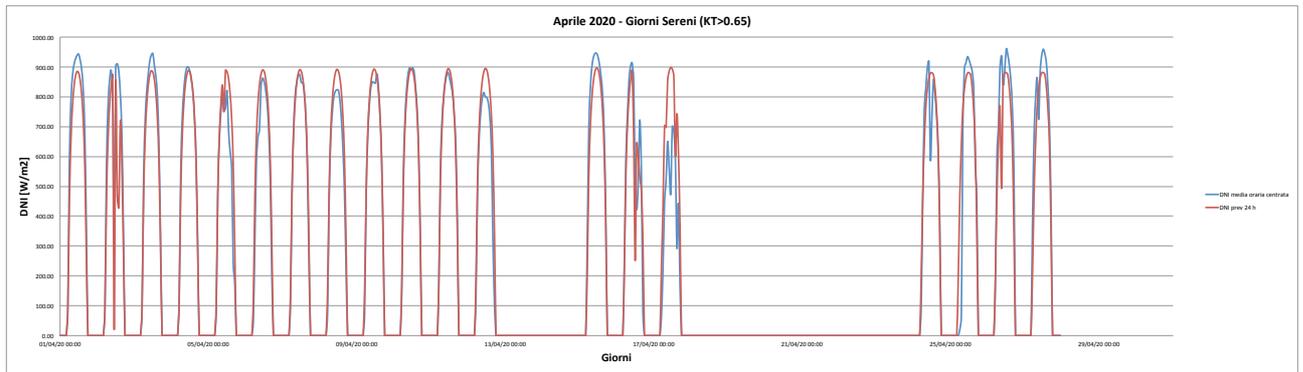


Figura 21.

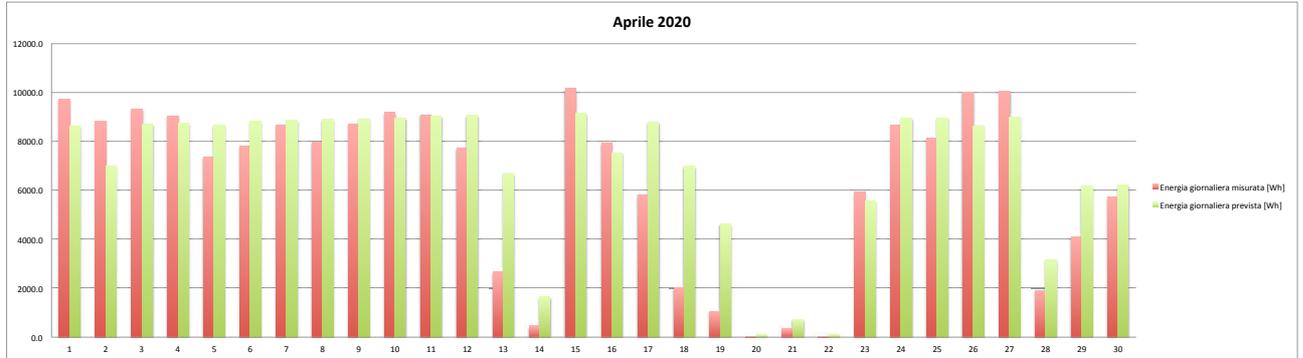


Figura 22.

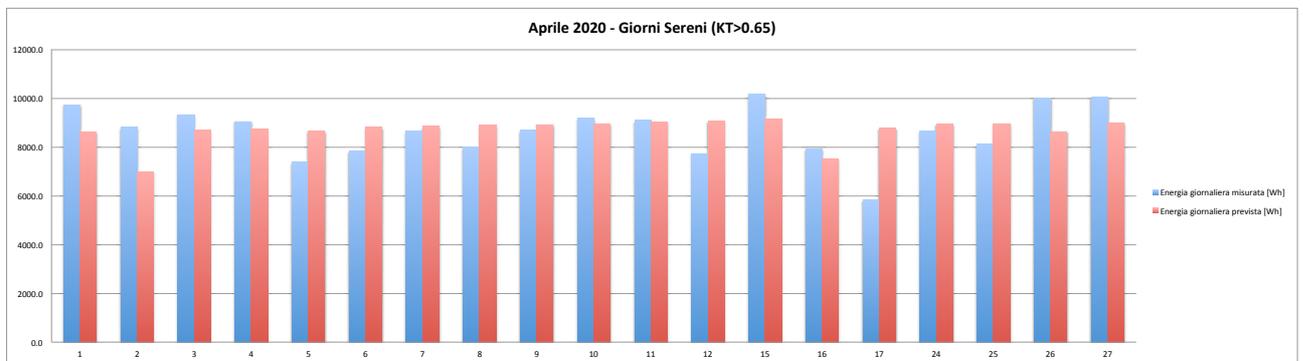


Figura 23.

6.5 Maggio 2020 24h

Giorni	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%	Tipo cielo
1	1415.3	996.8	53.48	46.85	90.69	PARZIALMENTE NUVOLOSO
2	5709.1	4743.4	168.54	30.81	70.85	PARZIALMENTE NUVOLOSO
3	9445.3	9648.2	95.91	14.65	24.37	SERENO
4	11066.2	10289.7	53.98	7.02	11.71	SERENO
5	5128.1	8319.0	224.27	65.10	104.96	PARZIALMENTE NUVOLOSO
6	5045.8	9449.8	358.57	109.32	170.55	PARZIALMENTE NUVOLOSO
7	11619.5	10349.3	72.59	10.93	14.99	SERENO
8	9069.1	8035.4	211.71	29.10	56.03	SERENO
9	6729.4	10389.3	272.73	54.39	97.27	SERENO
10	4743.4	10028.1	341.73	111.41	172.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	7560.1	9148.1	169.03	26.46	53.66	SERENO
12	4285.8	8517.1	319.37	98.73	178.84	PARZIALMENTE NUVOLOSO
13	1168.0	6803.9	345.78	482.52	710.50	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	2165.6	6045.2	251.69	179.15	278.93	PARZIALMENTE NUVOLOSO
15	6288.5	9265.9	207.53	48.24	79.20	SERENO
16	63.9	516.5	27.30	708.63	1025.76	NUVOLOSO
17	2911.4	5159.4	172.08	85.41	141.85	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	965.0	7016.5	360.38	627.10	896.28	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	5341.5	7760.1	198.41	60.34	89.15	PARZIALMENTE NUVOLOSO
20	5359.4	4189.9	278.22	72.55	124.59	PARZIALMENTE NUVOLOSO
21	11138.6	9959.6	75.08	12.17	16.18	SERENO
22	10754.2	9491.2	103.54	16.76	23.11	SERENO
23	10718.4	9991.6	51.29	8.15	11.49	SERENO
24	8610.9	9850.6	123.75	17.65	34.49	SERENO
25	9327.4	8178.1	110.57	15.79	28.45	SERENO
26	9747.3	8958.3	214.97	27.69	52.93	SERENO
27	11198.4	10051.4	93.34	12.92	20.00	SERENO
28	7664.3	7348.1	92.55	18.25	28.98	SERENO
29	1097.4	4666.0	314.97	347.96	688.83	NUVOLOSO
30	1703.4	5339.5	295.41	246.35	416.21	PARZIALMENTE NUVOLOSO
31	8070.1	8735.1	307.20	51.80	91.36	PARZIALMENTE NUVOLOSO
	196110.9	239241.1				
		0.82				

Tabella 9.

Giorni Sereni KT>0.65	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%
3	9445.3	9648.2	95.9	14.7	24.4
4	11066.2	10289.7	54.0	7.0	11.7
7	11619.5	10349.3	72.6	10.9	15.0
8	9069.1	8035.4	211.7	29.1	56.0
9	6729.4	10389.3	272.7	54.4	97.3
11	7560.1	9148.1	169.0	26.5	53.7
15	6288.5	9265.9	207.5	48.2	79.2
21	11138.6	9959.6	75.1	12.2	16.2
22	10754.2	9491.2	103.5	16.8	23.1
23	10718.4	9991.6	51.3	8.2	11.5
24	8610.9	9850.6	123.7	17.6	34.5
25	9327.4	8178.1	110.6	15.8	28.5
26	9747.3	8958.3	215.0	27.7	52.9
27	11198.4	10051.4	93.3	12.9	20.0
28	7664.3	7348.1	92.6	18.2	29.0
	140937.6	140954.9			
		1.00			

Tabella 10.

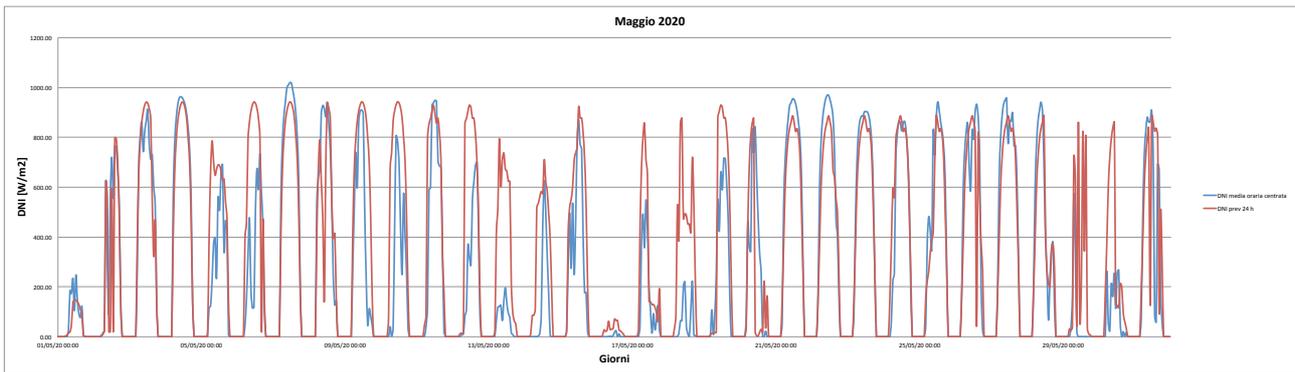


Figura 24.

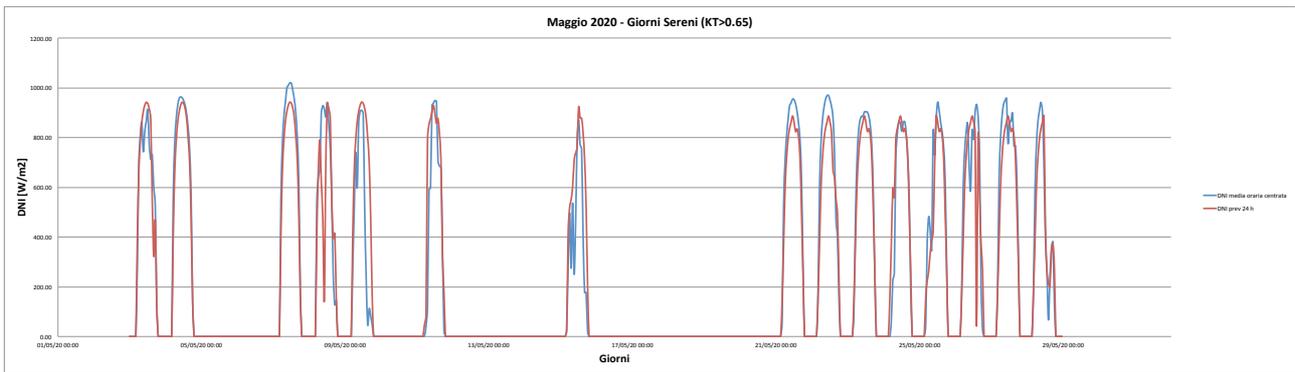


Figura 25.

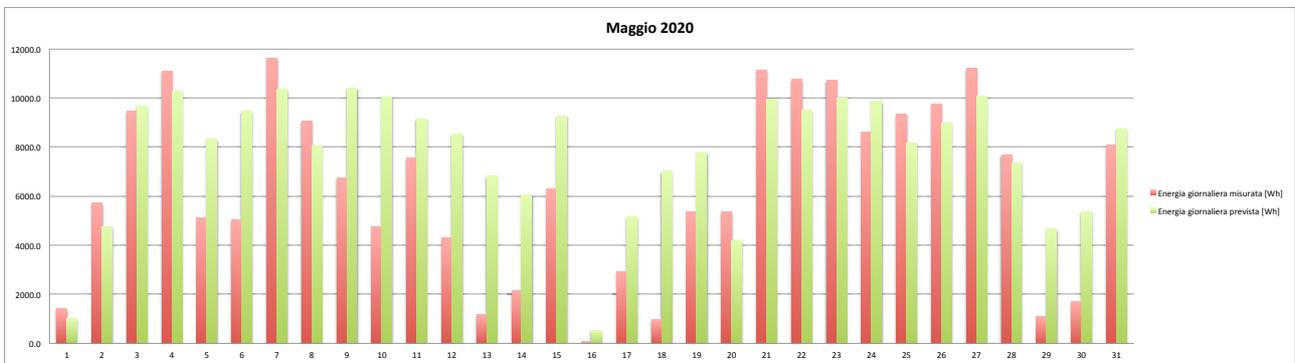


Figura 26.

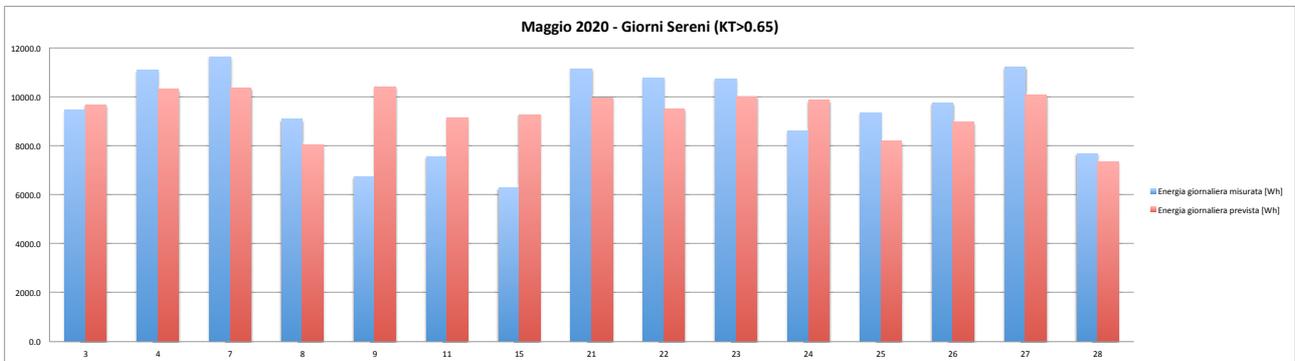


Figura 27.

6.6 Giugno 2020 24h

Giorni	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%	Tipo cielo
1	9751.3	9500.6	119.88	19.67	29.51	SERENO
2	8470.4	8538.2	143.43	26.65	40.64	SERENO
3	10097.3	9514.1	72.84	11.96	17.31	SERENO
4	3345.7	8186.3	307.25	144.68	220.40	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	3769.9	6472.7	183.25	76.35	116.66	PARZIALMENTE NUVOLOSO
6	11424.0	9530.4	112.14	16.58	23.56	SERENO
7	3298.4	6599.3	242.11	116.33	176.17	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	5707.8	7874.3	167.16	44.05	70.29	PARZIALMENTE NUVOLOSO
9	5682.4	8918.7	244.85	59.77	103.41	PARZIALMENTE NUVOLOSO
10	3657.8	6772.3	256.07	110.21	168.02	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	3189.9	5826.9	243.04	110.78	182.86	NUVOLOSO
12	10683.9	9460.2	88.67	12.37	19.92	SERENO
13	3742.8	7197.4	274.65	100.74	176.12	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	8215.2	8812.4	134.66	24.79	39.34	SERENO
15	8781.7	6664.7	230.61	37.83	63.02	SERENO
16	6426.7	7016.7	252.81	57.87	94.41	PARZIALMENTE NUVOLOSO
17	6689.8	9465.8	250.35	56.68	89.81	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	7943.0	8707.4	161.74	30.21	48.87	SERENO
19	4945.2	7767.9	223.39	64.72	108.42	PARZIALMENTE NUVOLOSO
20	11603.6	9464.6	131.94	18.43	27.29	SERENO
21	8549.1	5797.1	220.45	36.26	61.89	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	11275.2	9581.4	110.84	16.40	23.59	SERENO
23	10993.0	9578.8	87.55	12.86	19.11	SERENO
24	10225.1	9575.8	61.53	9.29	14.44	SERENO
25	10200.4	9572.4	54.26	6.96	12.77	SERENO
26	9779.7	9568.6	105.58	14.59	25.91	SERENO
27	10743.7	9564.4	77.85	12.18	17.39	SERENO
28	10772.5	9559.8	72.84	11.26	16.23	SERENO
29	10553.3	9424.9	68.43	10.69	15.56	SERENO
30	9903.8	9549.5	49.82	7.19	12.07	SERENO
	240422.7	254063.5				
		0.95				

Tabella 11.

Giorni Sereni KT>0.65	Energia giornaliera misurata	Energia giornaliera prevista	RMSE	nMAE%	RMSE%
1	9751.3	9500.6	119.9	19.7	29.5
2	8470.4	8538.2	143.4	26.7	40.6
3	10097.3	9514.1	72.8	12.0	17.3
6	11424.0	9530.4	112.1	16.6	23.6
12	10683.9	9460.2	88.7	12.4	19.9
14	8215.2	8812.4	134.7	24.8	39.3
15	8781.7	6664.7	230.6	37.8	63.0
18	7943.0	8707.4	161.7	30.2	48.9
20	11603.6	9464.6	131.9	18.4	27.3
22	11275.2	9581.4	110.8	16.4	23.6
23	10993.0	9578.8	87.5	12.9	19.1
24	10225.1	9575.8	61.5	9.3	14.4
25	10200.4	9572.4	54.3	7.0	12.8
26	9779.7	9568.6	105.6	14.6	25.9
27	10743.7	9564.4	77.9	12.2	17.4
28	10772.5	9559.8	72.8	11.3	16.2
29	10553.3	9424.9	68.4	10.7	15.6
30	9903.8	9549.5	49.8	7.2	12.1
	181417.2	166168.2			
		1.09			

Tabella 12.

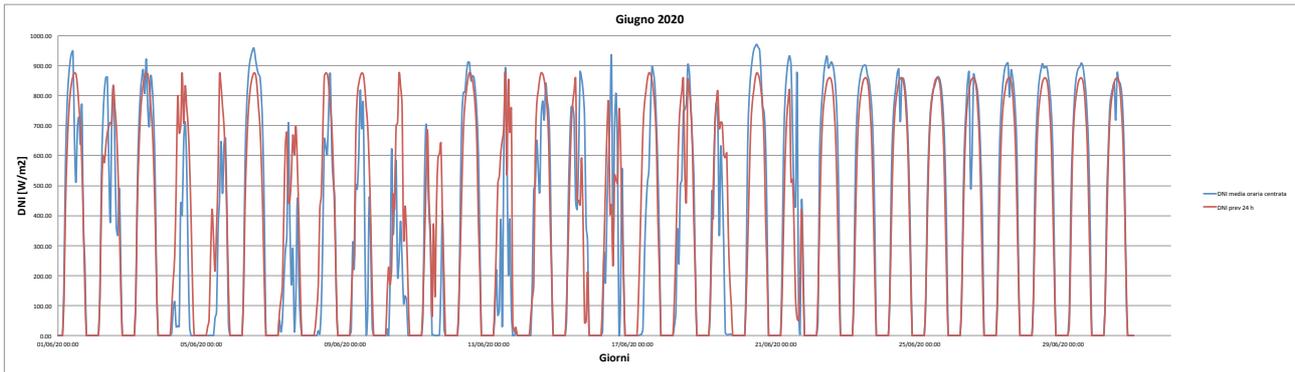


Figura 28.

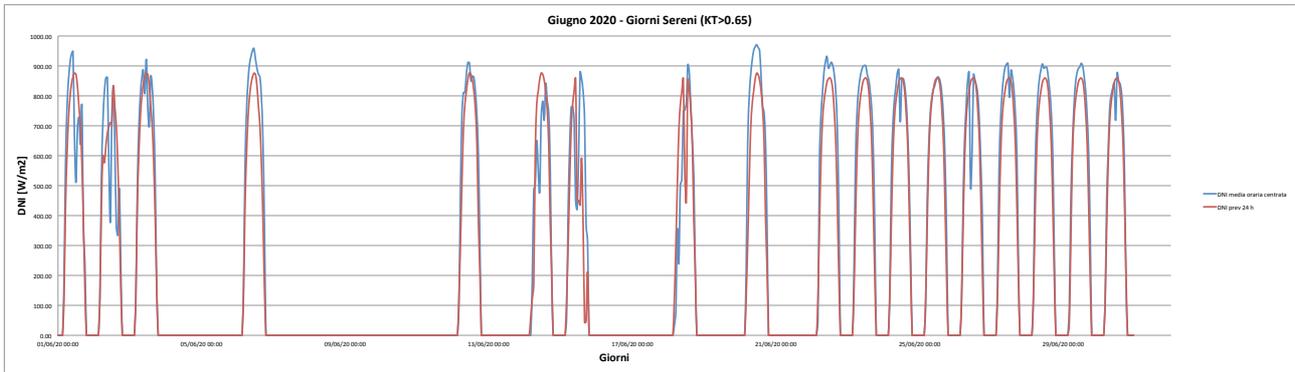


Figura 29.

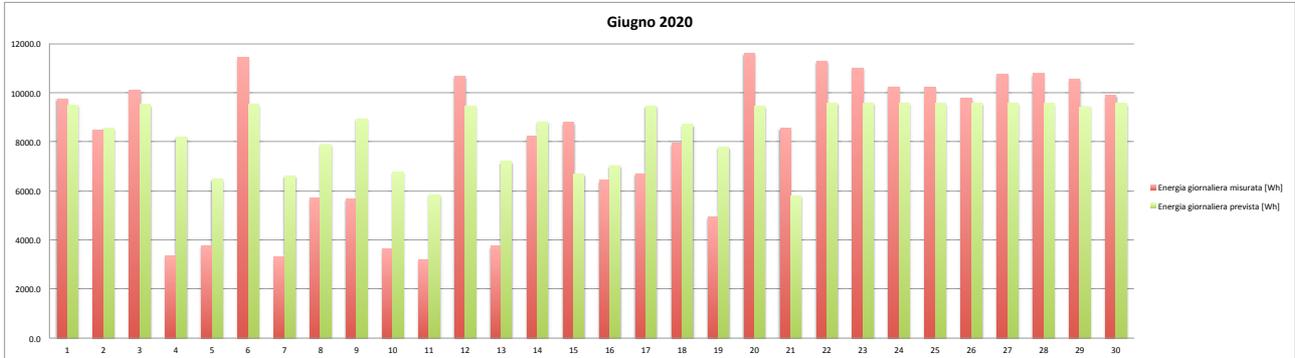


Figura 30.

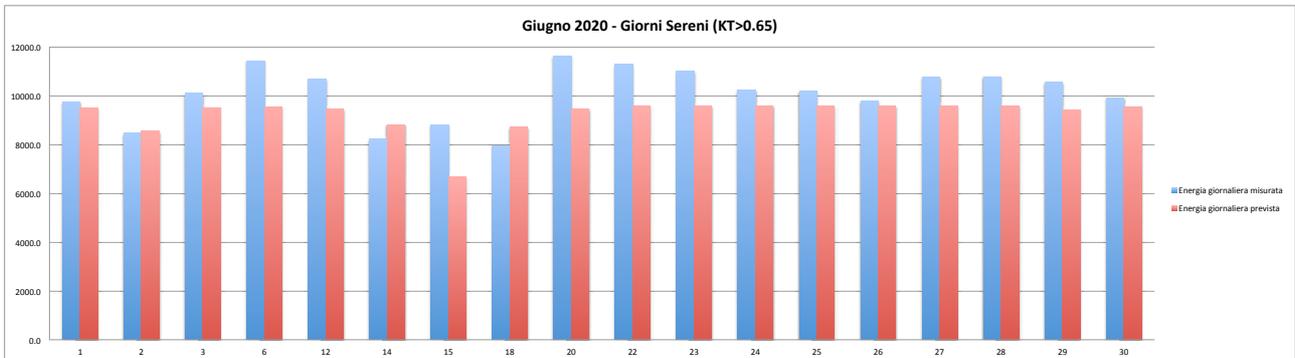


Figura 31.

6.7 Luglio 2020 24h

Giorni	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%	Tipo cielo
1	9825.8	9546.2	42.74	7.40	10.44	SERENO
2	8622.4	9540.0	78.82	10.71	21.94	SERENO
3	8695.8	9533.4	106.90	14.93	29.50	SERENO
4	3515.7	7019.0	282.1	124.60	192.58	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	11780.1	9518.7	125.55	19.20	25.58	SERENO
6	11358.6	9510.5	104.01	16.27	21.98	SERENO
7	9425.4	9195.0	99.49	15.58	25.33	SERENO
8	10068.5	9493.2	43.08	6.58	10.27	SERENO
9	10339.3	9484.4	54.50	8.62	12.65	SERENO
10	10605.1	9475.2	67.84	11.12	15.35	SERENO
11	8866.2	9315.0	37.57	7.36	10.17	SERENO
12	9420.0	9305.4	29.75	4.49	7.58	SERENO
13	7932.7	6943.7	246.37	41.07	74.54	SERENO
14	10889.7	9285.2	98.93	14.73	21.80	SERENO
15	6418.9	7547.9	148.46	31.37	55.51	PARZIALMENTE NUVOLOSO
16	6983.8	7525.3	198.08	38.71	68.07	PARZIALMENTE NUVOLOSO
17	5669.5	6830.7	126.25	26.95	53.44	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	8031.7	5985.1	274.84	48.93	82.13	SERENO
19	11746.1	9148.4	146.64	22.12	29.96	SERENO
20	11084.7	9217.4	106.47	16.85	23.05	SERENO
21	10591.1	9153.5	87.51	14.61	19.83	SERENO
22	10001.2	9143.2	65.14	11.35	15.63	SERENO
23	9324.7	9132.5	16.58	2.45	4.27	SERENO
24	9123.1	9121.5	28.75	4.49	7.56	SERENO
25	10304.4	9110.0	99.25	17.23	23.12	SERENO
26	10088.3	9098.1	104.37	16.95	24.83	SERENO
27	10446.6	9085.9	78.40	13.03	18.01	SERENO
28	10035.9	9073.1	60.53	9.59	14.48	SERENO
29	8572.6	9060.0	34.04	5.91	9.53	SERENO
30	9034.0	9046.4	26.97	4.39	7.17	SERENO
31	8857.7	9032.3	18.12	2.51	4.91	SERENO
	287659.7	273476.2				
		1.05				

Tabella 13.

Giorni Sereni KT>0.65	Energia giornaliera misurata	Energia giornaliera prevista	RMSE	nMAE%	RMSE%
1	9825.8	9546.2	42.7	7.4	10.4
2	8622.4	9540.0	78.8	10.7	21.9
3	8695.8	9533.4	106.9	14.9	29.5
5	11780.1	9518.7	125.5	19.2	25.6
6	11358.6	9510.5	104.0	16.3	22.0
7	9425.4	9195.0	99.5	15.6	25.3
8	10068.5	9493.2	43.1	6.6	10.3
9	10339.3	9484.4	54.5	8.6	12.7
10	10605.1	9475.2	67.8	11.1	15.4
11	8866.2	9315.0	37.6	7.4	10.2
12	9420.0	9305.4	29.8	4.5	7.6
13	7932.7	6943.7	246.4	41.1	74.5
14	10889.7	9285.2	98.9	14.7	21.8
18	8031.7	5985.1	274.8	48.9	82.1
19	11746.1	9148.4	146.6	22.1	30.0
20	11084.7	9217.4	106.5	16.8	23.1
21	10591.1	9153.5	87.5	14.6	19.8
22	10001.2	9143.2	65.1	11.3	15.6
23	9324.7	9132.5	16.6	2.5	4.3
24	9123.1	9121.5	28.7	4.5	7.6
25	10304.4	9110.0	99.3	17.2	23.1
26	10088.3	9098.1	104.4	16.9	24.8
27	10446.6	9085.9	78.4	13.0	18.0
28	10035.9	9073.1	60.5	9.6	14.5
29	8572.6	9060.0	34.0	5.9	9.5
30	9034.0	9046.4	27.0	4.4	7.2
31	8857.7	9032.3	18.1	2.5	4.9
	265071.8	244553.4			
		1.08			

Tabella 14.

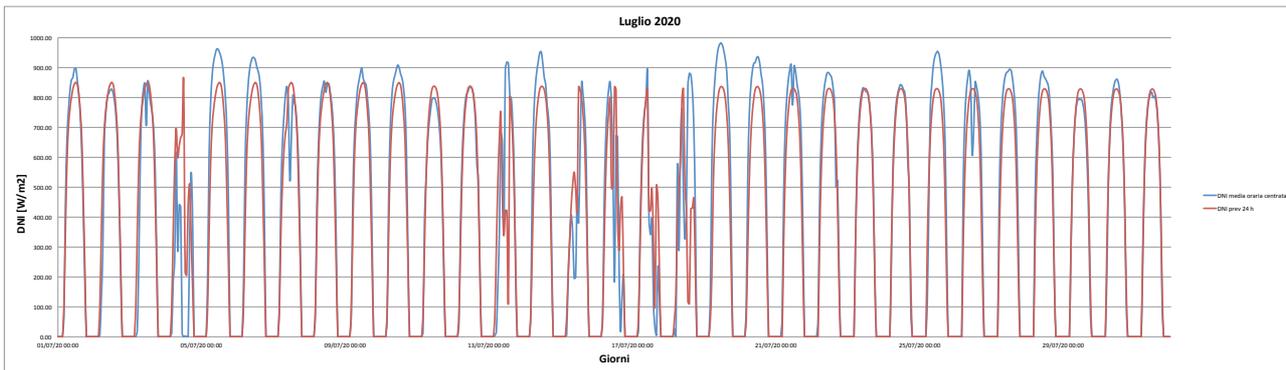


Figura 32.

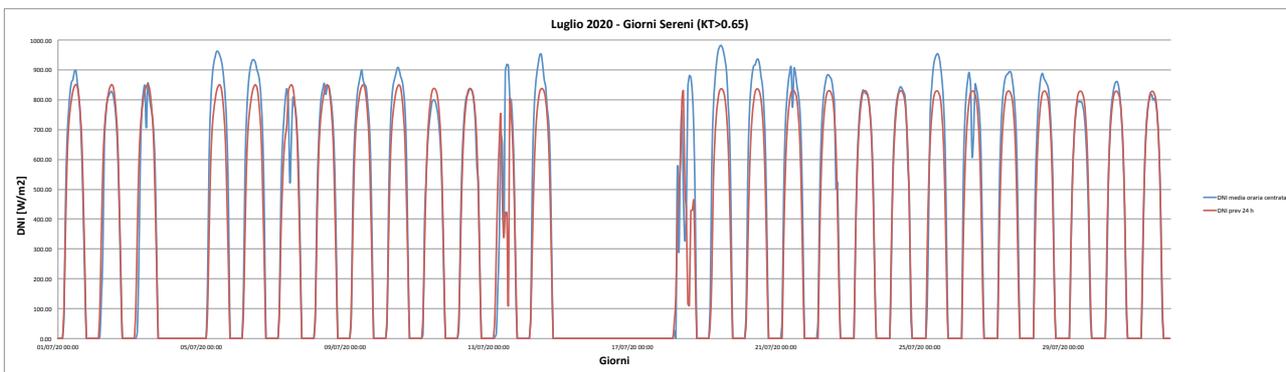


Figura 33.

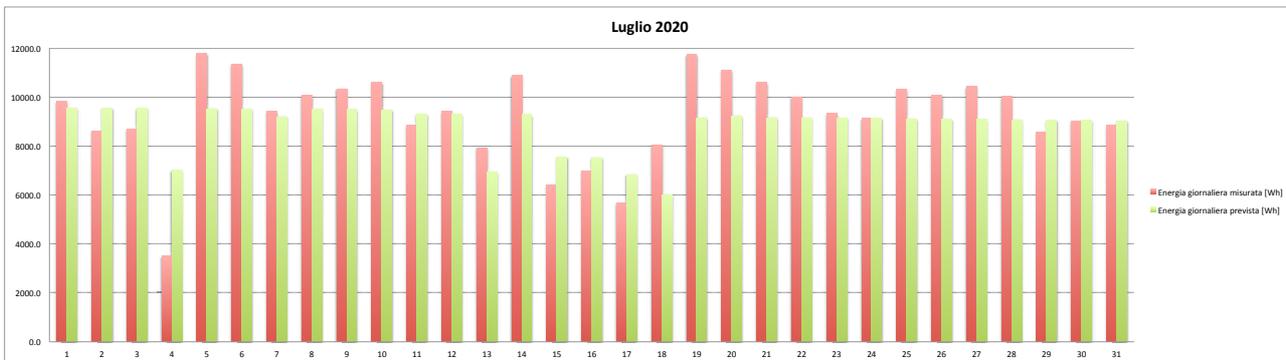


Figura 34.

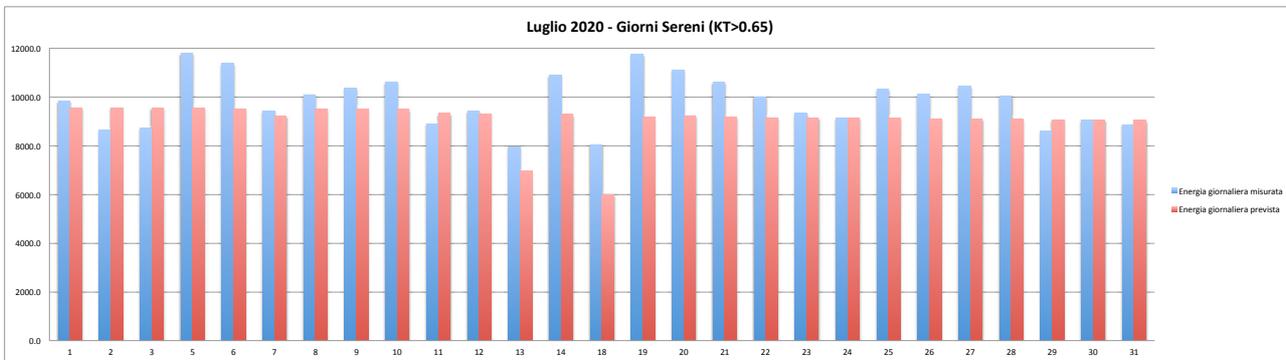


Figura 35.

6.8 Agosto 2020 24h

Giorni	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%	Tipo cielo
1	9281.1	8515.1	56.02	8.29	14.49	SERENO
2	8607.1	8874.1	35.42	6.40	9.88	SERENO
3	4913.2	5969.7	142.20	42.14	69.46	PARZIALMENTE NUVOLOSO
4	7141.0	7326.4	126.04	18.39	42.36	PARZIALMENTE NUVOLOSO
5	8069.6	7164.6	183.26	34.86	54.50	PARZIALMENTE NUVOLOSO
6	9821.4	6885.7	182.22	29.89	44.53	SERENO
7	6217.9	6675.3	129.46	26.97	49.97	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	7890.6	8756.3	118.28	19.65	35.98	SERENO
9	8345.7	8735.2	63.76	8.13	18.34	SERENO
10	8347.7	8713.6	44.05	7.27	12.66	SERENO
11	8149.0	8688.9	52.00	9.91	15.31	SERENO
12	8694.2	8663.4	29.84	4.29	8.24	SERENO
13	7852.9	8199.3	64.93	12.35	19.84	SERENO
14	7642.9	8611.5	72.48	13.06	22.76	SERENO
15	7407.4	8585.2	145.51	20.61	47.14	SERENO
16	8883.8	8558.2	30.95	5.09	8.36	SERENO
17	6346.4	8182.3	159.20	28.93	60.21	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	4106.9	7704.7	245.13	92.46	143.25	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	9937.7	8476.5	87.70	14.70	21.18	SERENO
20	9477.0	8435.0	75.10	12.69	19.02	SERENO
21	9511.6	7980.0	94.49	16.10	23.84	SERENO
22	8277.5	7964.4	39.64	6.13	11.49	SERENO
23	9209.0	7948.3	84.52	13.69	22.03	SERENO
24	7240.5	7931.8	116.50	20.31	38.62	SERENO
25	8804.2	7914.9	77.24	12.57	21.06	SERENO
26	9517.2	7897.6	104.43	17.02	26.33	SERENO
27	7338.3	7877.4	129.53	20.39	42.36	SERENO
28	8255.1	7856.7	96.66	18.00	28.10	SERENO
29	6209.4	7835.5	226.31	43.60	87.47	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	620.0	2714.9	164.38	390.95	636.36	NUVOLOSO
31	140.2	1152.1	108.28	721.51	1853.05	NUVOLOSO
	232256.5	236794.5				
		0.98				

Tabella 15.

Giorni Sereni KT>0.65	Energia giornaliera misurata	Energia giornaliera prevista	RMSE	nMAE%	RMSE%
1	9281.1	8515.1	56.0	8.3	14.5
2	8607.1	8874.1	35.4	6.4	9.9
6	9821.4	6885.7	182.2	29.9	44.5
8	7890.6	8756.3	118.3	19.6	36.0
9	8345.7	8735.2	63.8	8.1	18.3
10	8347.7	8713.6	44.1	7.3	12.7
11	8149.0	8688.9	52.0	9.9	15.3
12	8694.2	8663.4	29.8	4.3	8.2
13	7852.9	8199.3	64.9	12.4	19.8
14	7642.9	8611.5	72.5	13.1	22.8
15	7407.4	8585.2	145.5	20.6	47.1
16	8883.8	8558.2	31.0	5.1	8.4
19	9937.7	8476.5	87.7	14.7	21.2
20	9477.0	8435.0	75.1	12.7	19.0
21	9511.6	7980.0	94.5	16.1	23.8
22	8277.5	7964.4	39.6	6.1	11.5
23	9209.0	7948.3	84.5	13.7	22.0
24	7240.5	7931.8	116.5	20.3	38.6
25	8804.2	7914.9	77.2	12.6	21.1
26	9517.2	7897.6	104.4	17.0	26.3
27	7338.3	7877.4	129.5	20.4	42.4
28	8255.1	7856.7	96.7	18.0	28.1
	188491.9	182069.1			
		1.04			

Tabella 16.

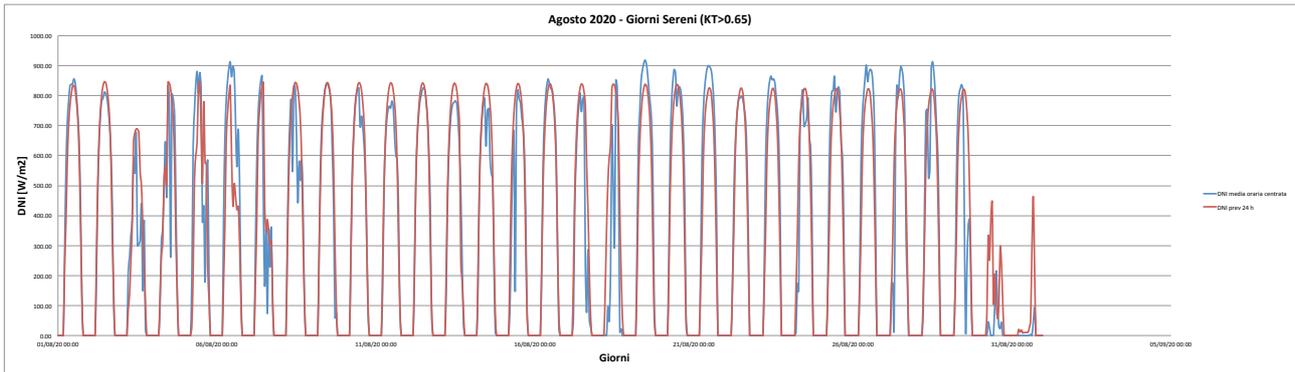


Figura 36.

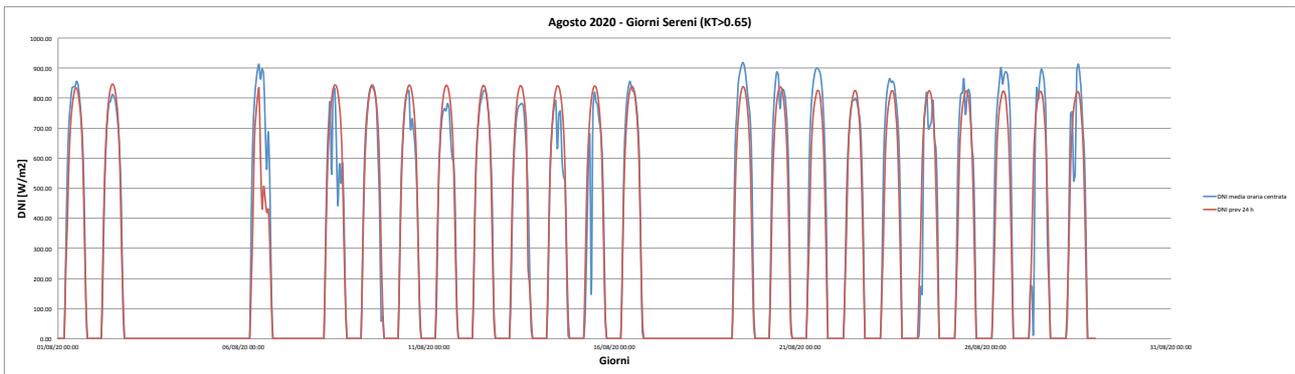


Figura 37.

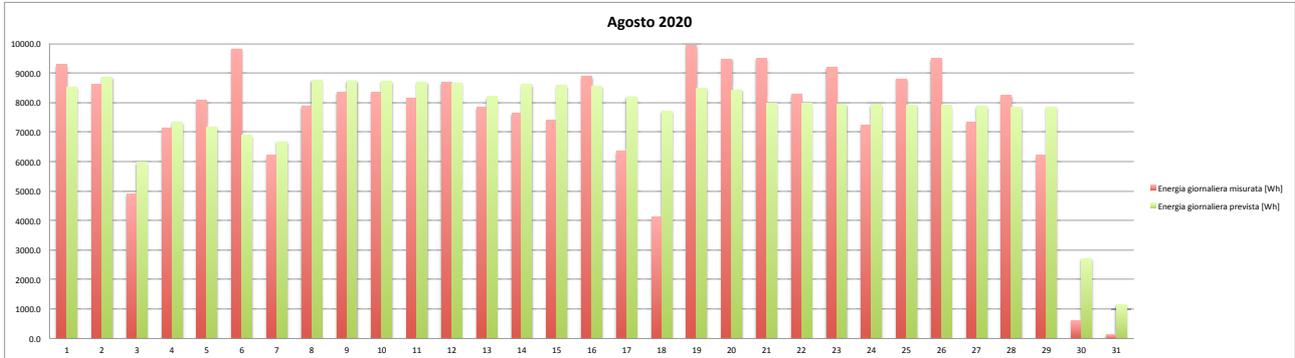


Figura 38.

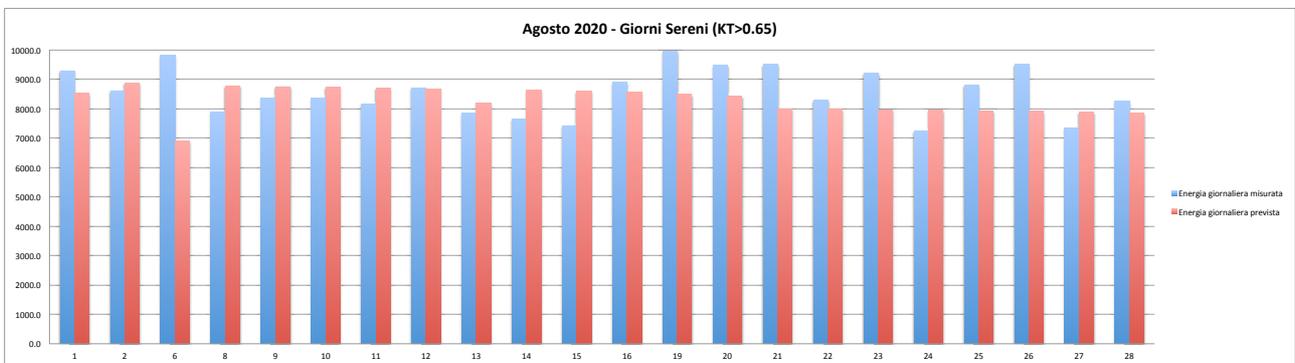


Figura 39.

6.9 Settembre 2020 24h

Giorni	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%	Tipo cielo
1	8124.7	8784.5	124.05	20.03	36.64	SERENO
2	3594.7	6277.5	229.20	96.63	153.02	PARZIALMENTE NUVOLOSO
3	9440.0	8223.9	128.28	19.53	32.61	SERENO
4	9968.8	8703.7	81.19	12.69	19.55	SERENO
5	9435.5	8675.6	77.40	12.62	19.69	SERENO
6	7861.2	8646.7	174.44	27.32	53.25	SERENO
7	8496.3	8617.0	43.26	7.03	12.22	SERENO
8	6339.9	8586.3	165.62	35.43	62.70	PARZIALMENTE NUVOLOSO
9	7383.7	8554.4	71.75	15.85	23.32	PARZIALMENTE NUVOLOSO
10	3756.2	7783.1	275.25	107.20	175.87	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	1817.2	4885.1	226.00	174.53	298.49	PARZIALMENTE NUVOLOSO
12	7158.7	8317.6	85.07	16.19	28.52	SERENO
13	7184.3	8281.6	66.31	15.27	22.15	SERENO
14	6967.3	8245.5	86.39	18.55	29.76	SERENO
15	6442.1	6660.7	49.77	10.49	18.54	SERENO
16	6508.0	6962.1	100.49	25.48	37.06	SERENO
17	7121.6	8136.7	61.75	14.25	20.81	SERENO
18	6777.4	7287.6	87.19	21.03	30.87	SERENO
19	3965.7	7539.6	218.68	90.12	132.34	PARZIALMENTE NUVOLOSO
20	4419.2	7578.8	231.56	80.08	125.76	PARZIALMENTE NUVOLOSO
21	2180.9	5481.5	253.22	151.36	278.66	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	3914.8	5018.4	147.86	47.28	90.65	PARZIALMENTE NUVOLOSO
23	2163.4	2013.8	141.27	82.55	156.72	PARZIALMENTE NUVOLOSO
24	2557.1	2006.1	122.62	60.06	115.08	PARZIALMENTE NUVOLOSO
25	3519.7	2858.2	163.96	54.90	111.80	PARZIALMENTE NUVOLOSO
26	1781.1	5732.3	315.60	243.99	425.27	NUVOLOSO
27	1.7	166.9	10.45	9845.74	14949.78	NUVOLOSO
28	1760.8	1779.9	170.20	133.51	231.98	NUVOLOSO
29	7735.5	8034.3	64.92	11.01	20.14	SERENO
30	2953.1	6477.8	269.84	128.32	219.30	PARZIALMENTE NUVOLOSO
	161330.6	196317.1				
		0.82				

Tabella 17.

Giorni Sereni KT>0.65	Energia giornaliera misurata	Energia giornaliera prevista	RMSE	nMAE%	RMSE%
1	8124.7	8784.5	124.0	20.0	36.6
3	9440.0	8223.9	128.3	19.5	32.6
4	9968.8	8703.7	81.2	12.7	19.5
5	9435.5	8675.6	77.4	12.6	19.7
6	7861.2	8646.7	174.4	27.3	53.3
7	8496.3	8617.0	43.3	7.0	12.2
12	7158.7	8317.6	85.1	16.2	28.5
13	7184.3	8281.6	66.3	15.3	22.2
14	6967.3	8245.5	86.4	18.5	29.8
15	6442.1	6660.7	49.8	10.5	18.5
16	6508.0	6962.1	100.5	25.5	37.1
17	7121.6	8136.7	61.8	14.3	20.8
18	6777.4	7287.6	87.2	21.0	30.9
29	7735.5	8034.3	64.9	11.0	20.1
	109221.3	113577.5			
		0.96			

Tabella 18.

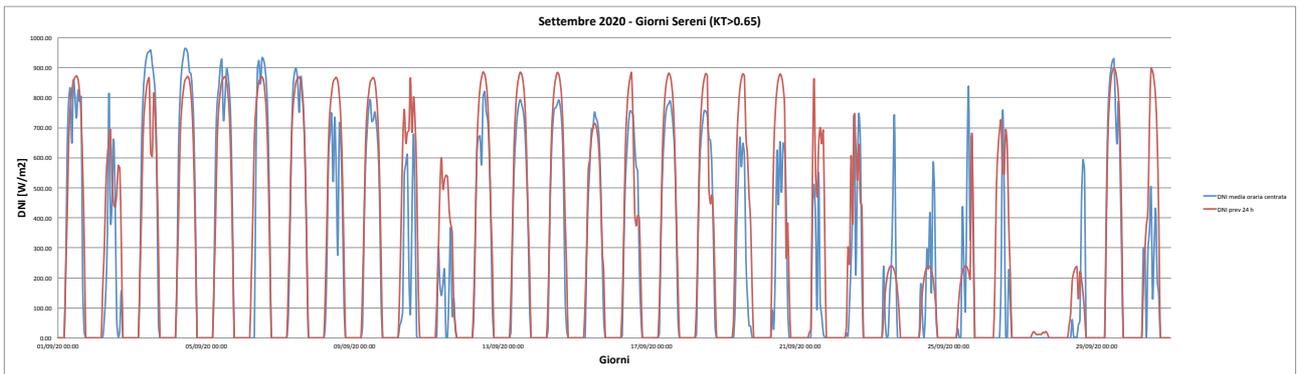


Figura 40.

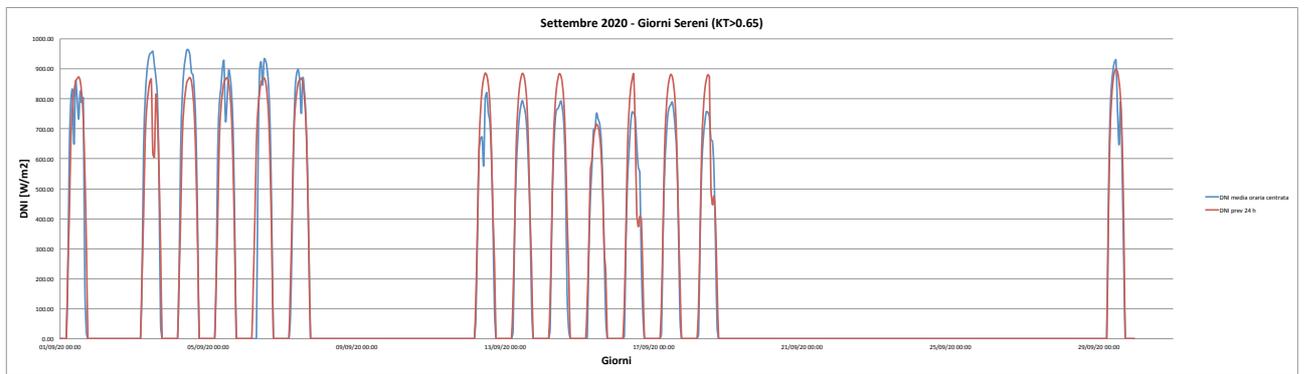


Figura 41.

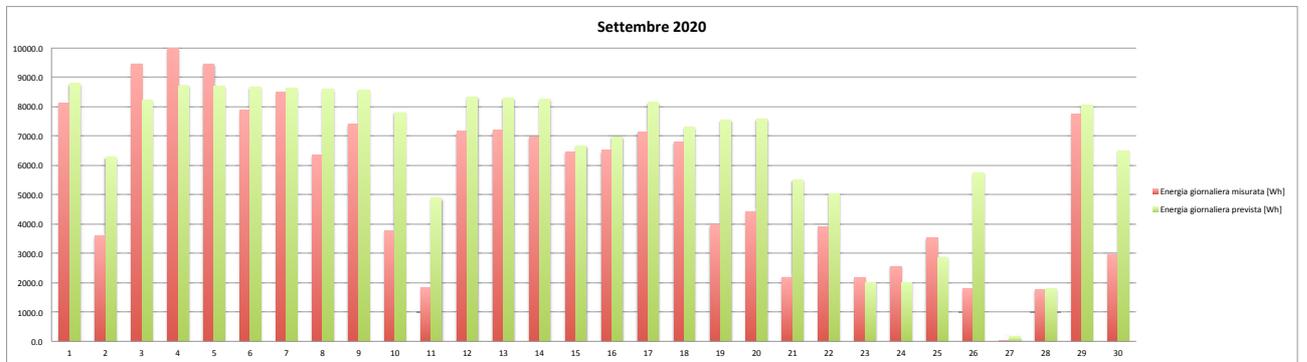


Figura 42.

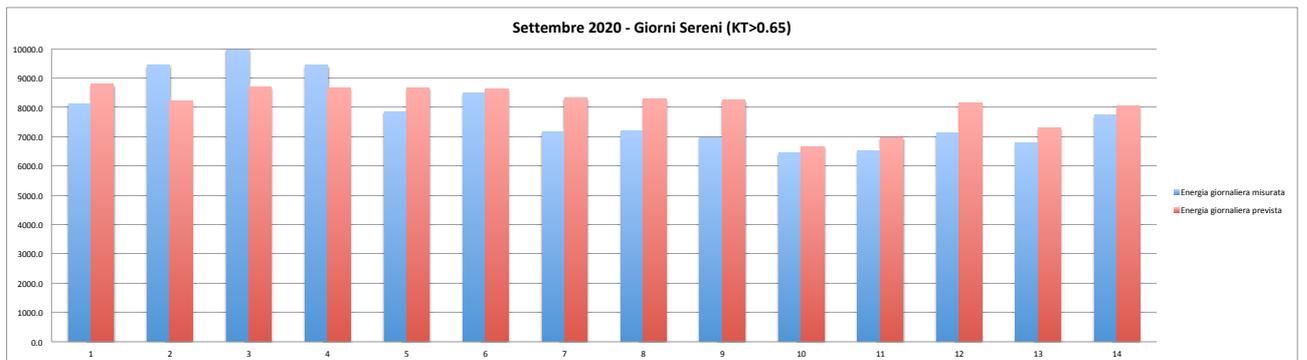


Figura 43.

6.10 Ottobre 2020 24h

Giorni	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%	Tipo cielo
1	6230.8	7352.6	122.41	20.78	47.15	PARZIALMENTE NUVOLOSO
2	711.2	5588.9	319.82	685.79	1079.18	PARZIALMENTE NUVOLOSO
3	311.4	3022.6	231.56	870.79	1784.95	NUVOLOSO
4	1186.2	4833.3	243.55	307.48	492.79	NUVOLOSO
5	5096.6	7396.3	199.68	47.28	94.03	PARZIALMENTE NUVOLOSO
6	6383.3	6763.5	119.46	23.87	44.91	PARZIALMENTE NUVOLOSO
7	3353.3	5940.5	222.44	80.94	159.20	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	8874.7	7315.6	99.34	17.57	26.86	SERENO
9	7073.0	7287.7	54.67	8.22	18.55	SERENO
10	6430.4	7259.2	128.40	24.10	47.92	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	439.6	3453.4	203.77	685.62	1112.55	NUVOLOSO
12	2166.0	478.3	198.38	86.17	219.81	PARZIALMENTE NUVOLOSO
13	5418.8	6895.0	181.21	43.36	80.26	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	1055.1	3081.3	171.51	213.94	390.13	NUVOLOSO
15	4089.6	5106.3	128.60	41.96	75.47	PARZIALMENTE NUVOLOSO
16	2078.4	3751.1	167.10	114.26	192.96	PARZIALMENTE NUVOLOSO
17	4596.7	6105.6	194.88	56.59	101.75	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	7983.0	6743.5	80.85	15.53	24.31	SERENO
19	6663.3	6711.5	110.39	19.77	39.76	SERENO
20	6322.5	6167.9	56.52	12.56	21.45	SERENO
21	6563.4	6671.9	125.44	25.29	45.87	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	5625.3	6637.5	142.05	32.34	60.61	PARZIALMENTE NUVOLOSO
23	113.9	3015.0	196.08	2546.80	4131.25	NUVOLOSO
24	1259.8	2100.4	84.75	69.00	161.45	NUVOLOSO
25	3079.2	4371.7	139.26	60.91	108.54	PARZIALMENTE NUVOLOSO
26	998.0	3105.9	177.45	211.21	426.73	NUVOLOSO
27	3202.8	6453.3	231.01	103.83	173.10	PARZIALMENTE NUVOLOSO
28	6757.2	6413.3	93.30	20.36	33.14	SERENO
29	3864.2	5885.6	153.11	52.31	95.09	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	3169.9	4901.1	164.17	70.01	124.30	PARZIALMENTE NUVOLOSO
31	6521.2	6281.0	98.21	19.82	36.14	PARZIALMENTE NUVOLOSO
	127618.8	167090.7				
		0.76				

Tabella 19.

Giorni Sereni KT>0.65	Energia giornaliera misurata	Energia giornaliera prevista	RMSE	nMAE%	RMSE%
8	8874.7	7315.6	99.3	17.6	26.9
9	7073.0	7287.7	54.7	8.2	18.6
18	7983.0	6743.5	80.9	15.5	24.3
19	6663.3	6711.5	110.4	19.8	39.8
20	6322.5	6167.9	56.5	12.6	21.5
28	6757.2	6413.3	93.3	20.4	33.1
	43673.7	40639.4			
		1.07			

Tabella 20.

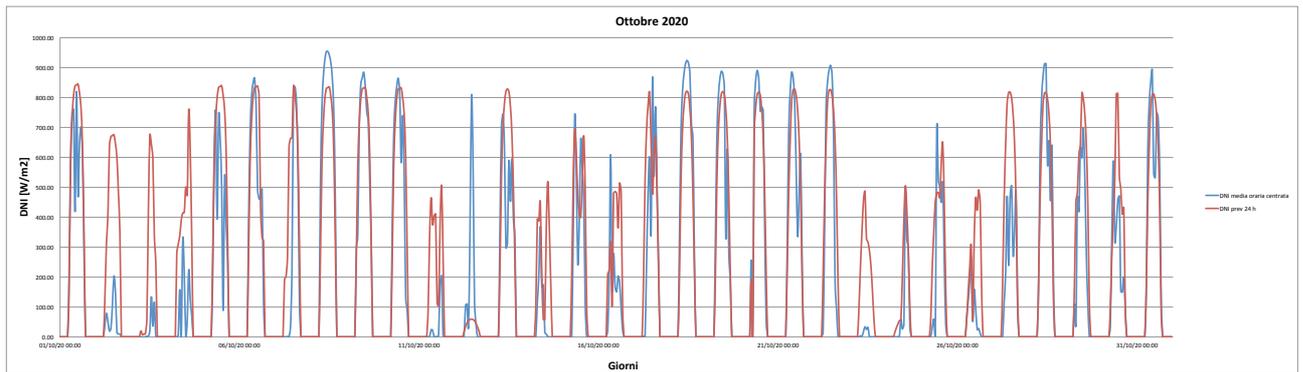


Figura 44.

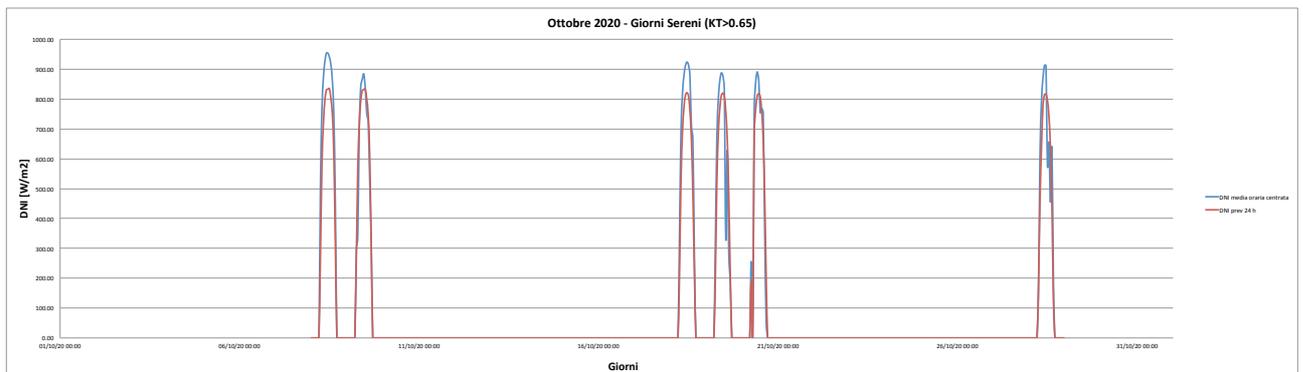


Figura 45.

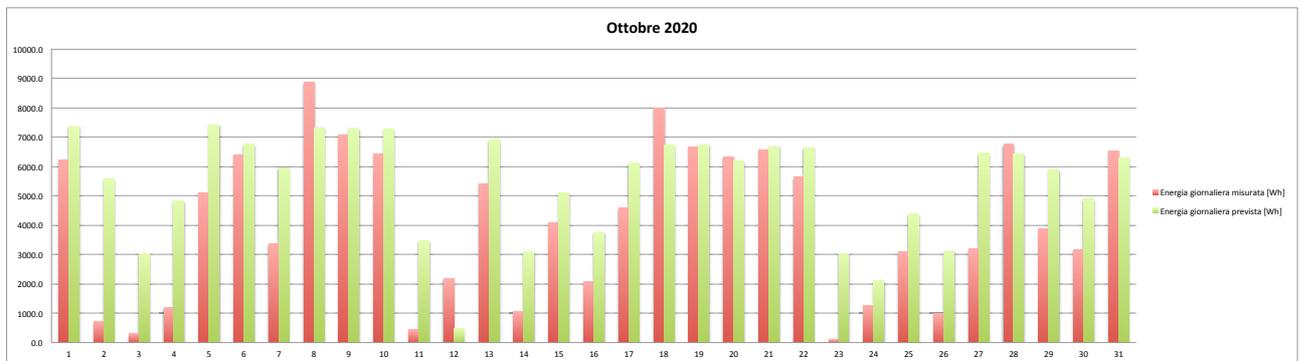


Figura 46.

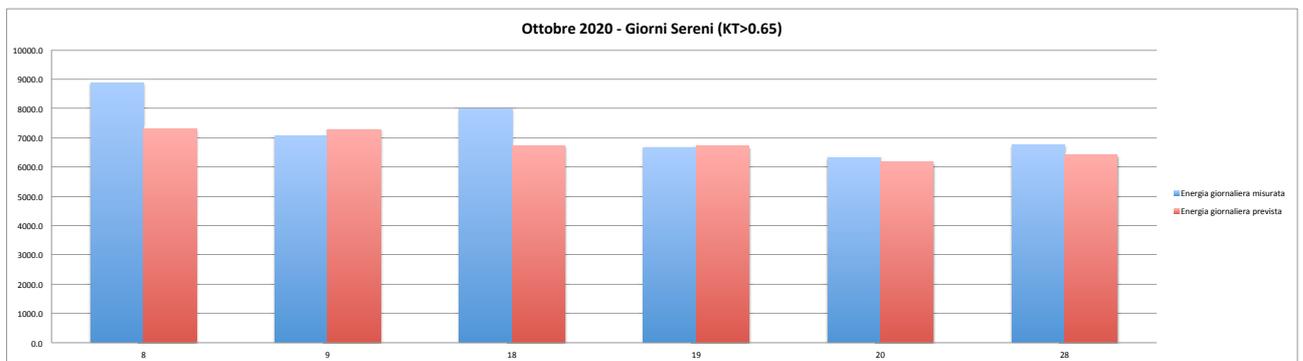


Figura 47.

6.11 Novembre 2020 24h

Giorni	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%	Tipo cielo
1	4479.2	3308.0	142.39	42.69	76.29	PARZIALMENTE NUVOLOSO
2	637.1	5555.6	358.63	771.95	1350.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO
3	4958.8	6161.8	132.65	28.18	64.20	PARZIALMENTE NUVOLOSO
4	3.1	811.8	57.29	26436.51	44943.73	NUVOLOSO
5	86.3	808.1	51.73	836.24	1438.38	NUVOLOSO
6	6390.1	5701.7	77.83	10.77	29.23	PARZIALMENTE NUVOLOSO
7	5959.9	6074.5	18.23	4.04	7.34	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	5574.6	6052.7	89.46	19.01	38.52	PARZIALMENTE NUVOLOSO
9	5562.4	6030.9	46.05	10.77	19.87	PARZIALMENTE NUVOLOSO
10	5335.3	6009.1	48.13	12.63	21.65	PARZIALMENTE NUVOLOSO
11	3786.3	5158.4	148.09	50.86	93.87	PARZIALMENTE NUVOLOSO
12	1405.8	998.0	83.64	63.67	142.79	PARZIALMENTE NUVOLOSO
13	4292.8	5050.2	144.12	43.71	80.57	PARZIALMENTE NUVOLOSO
14	167.1	2677.5	185.70	1502.72	2667.73	NUVOLOSO
15	1061.3	1610.6	84.25	93.25	190.54	PARZIALMENTE NUVOLOSO
16	1.5	79.8	5.45	5370.15	8969.40	NUVOLOSO
17	5004.2	5713.2	144.04	35.19	69.08	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	6749.8	5838.8	64.40	13.50	22.90	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	6341.5	5818.3	55.30	11.74	20.93	PARZIALMENTE NUVOLOSO
20	276.0	65.6	47.51	106.32	413.11	NUVOLOSO
21	6516.0	6304.3	28.41	5.41	10.47	SERENO
22	6554.5	6281.2	38.73	7.40	14.18	SERENO
23	6695.0	6258.5	32.31	6.52	11.58	PARZIALMENTE NUVOLOSO
24	4689.3	5111.4	120.04	24.47	61.44	PARZIALMENTE NUVOLOSO
25	2655.7	5716.7	281.82	141.86	254.68	PARZIALMENTE NUVOLOSO
26	5577.8	837.3	337.30	84.99	145.13	SERENO
27	1759.2	3594.1	203.60	139.51	277.75	PARZIALMENTE NUVOLOSO
28	485.7	289.8	60.37	93.17	298.30	PARZIALMENTE NUVOLOSO
29	1414.3	3201.6	158.00	141.27	268.13	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	6158.5	6111.5	8.73	1.38	3.40	PARZIALMENTE NUVOLOSO
	110579.1	123231.1				
		0.90				

Tabella 21.

Giorni Sereni KT>0.65	Energia giornaliera misurata	Energia giornaliera prevista	RMSE	nMAE%	RMSE%
21	6516.0	6304.3	28.4	5.4	10.5
22	6554.5	6281.2	38.7	7.4	14.2
26	5577.8	837.3	337.3	85.0	145.1
	18648.3	13422.8			
		1.39			

Tabella 22.

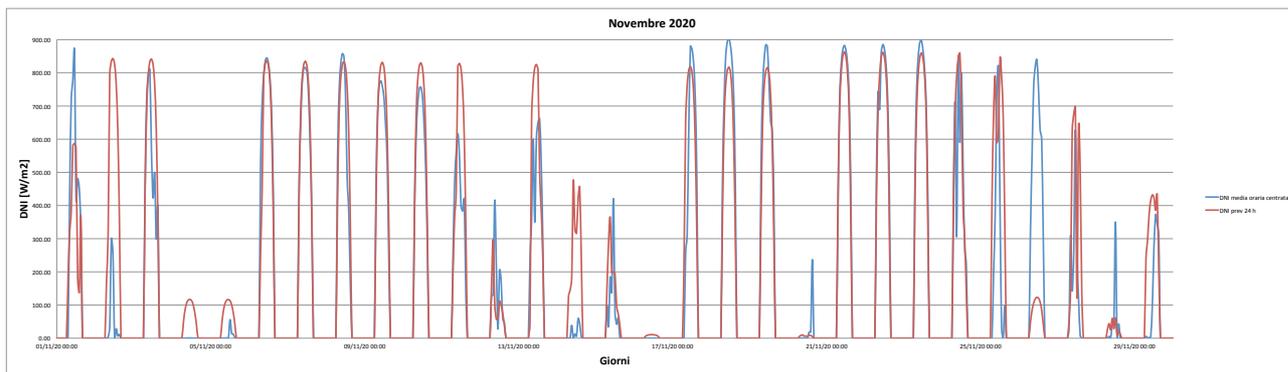


Figura 48.

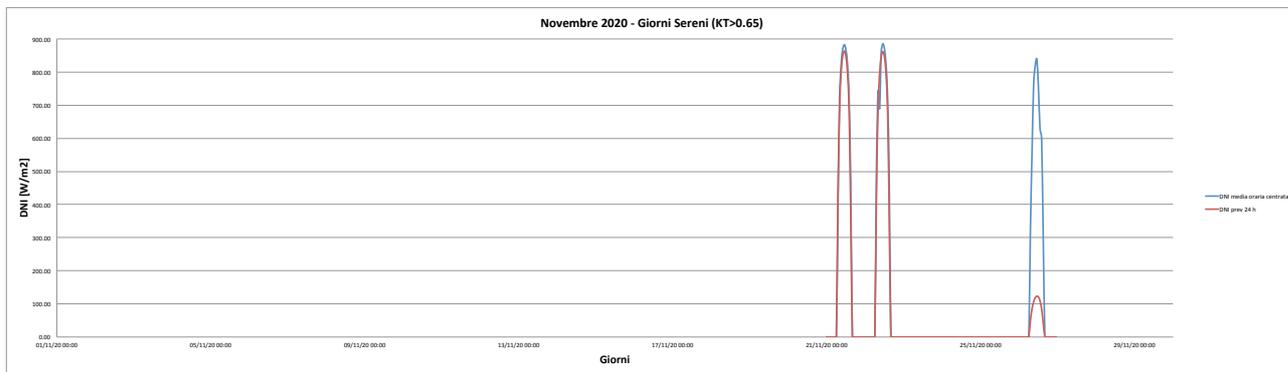


Figura 49.

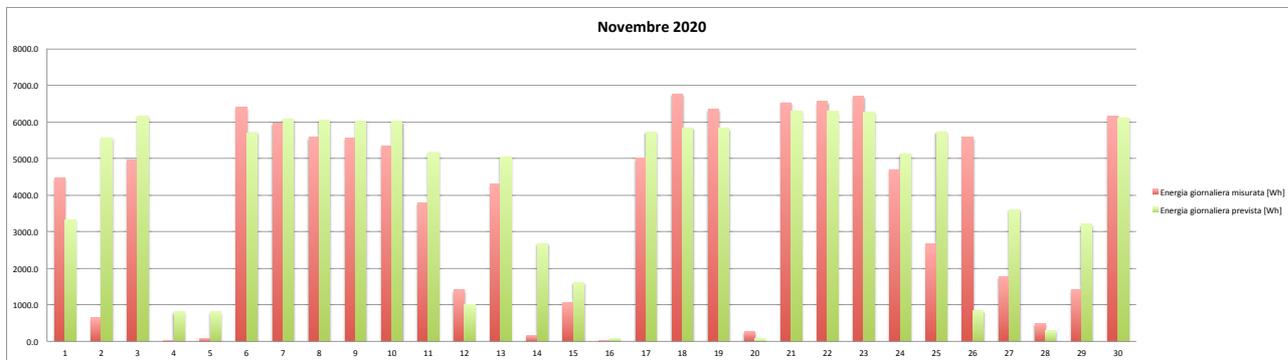


Figura 50.



Figura 51.

6.12 Dicembre 2020 24h

Giorni	Energia giornaliera misurata [Wh]	Energia giornaliera prevista [Wh]	RMSE	nMAE%	RMSE%	Tipo cielo
1	926.9	2413.5	159.67	189.25	413.43	NUVOLOSO
2	0.8	44.6	3.46	5204.47	9892.59	NUVOLOSO
3	2333.6	2210.1	180.34	79.85	185.47	PARZIALMENTE NUVOLOSO
4	320.3	207.7	23.55	67.10	176.44	NUVOLOSO
5	523.4	79.2	44.17	89.66	202.51	NUVOLOSO
6	1.6	468.9	55.33	29251.19	83119.58	NUVOLOSO
7	1906.8	827.4	118.67	70.43	149.36	PARZIALMENTE NUVOLOSO
8	242.6	194.8	21.53	64.99	213.01	NUVOLOSO
9	821.5	854.5	96.69	132.70	282.49	NUVOLOSO
10	763.1	2188.1	117.92	186.72	370.84	NUVOLOSO
11	5030.6	784.5	333.83	84.40	159.26	PARZIALMENTE NUVOLOSO
12	953.6	1032.9	66.67	64.13	167.79	PARZIALMENTE NUVOLOSO
13	6416.5	5893.5	43.39	9.14	16.23	SERENO
14	6727.2	5884.6	59.34	12.53	21.17	SERENO
15	1344.3	2782.3	149.11	135.36	266.20	PARZIALMENTE NUVOLOSO
16	5403.8	4381.8	118.86	24.50	52.79	PARZIALMENTE NUVOLOSO
17	4279.3	1746.6	215.66	63.24	120.95	PARZIALMENTE NUVOLOSO
18	5592.5	5858.2	25.27	5.23	10.84	PARZIALMENTE NUVOLOSO
19	174.7	4683.8	321.59	2580.68	4417.37	NUVOLOSO
20	3547.6	4273.5	126.84	37.71	85.81	PARZIALMENTE NUVOLOSO
21	5107.1	5800.8	61.75	14.52	29.02	PARZIALMENTE NUVOLOSO
22	1904.5	2787.5	173.98	108.44	219.24	PARZIALMENTE NUVOLOSO
23	799.9	777.4	61.44	77.45	184.35	PARZIALMENTE NUVOLOSO
24	456.9	63.8	43.49	92.41	228.47	PARZIALMENTE NUVOLOSO
25	167.1	3226.8	213.67	1830.51	3067.90	NUVOLOSO
26	1714.1	3076.2	157.87	91.24	221.05	PARZIALMENTE NUVOLOSO
27	5907.2	5447.0	70.12	14.95	28.49	PARZIALMENTE NUVOLOSO
28	1.8	43.3	2.99	2364.22	4086.24	NUVOLOSO
29	3217.6	460.7	242.89	88.74	181.17	PARZIALMENTE NUVOLOSO
30	1213.7	247.0	128.65	80.39	254.40	NUVOLOSO
31	4802.4	5830.3	137.94	29.61	68.94	PARZIALMENTE NUVOLOSO
	72603.2	74571.4				
		0.97				

Tabella 23.

Giorni Sereni KT>0.65	Energia giornaliera misurata	Energia giornaliera prevista	RMSE	nMAE%	RMSE%
13	6416.5	5893.5	43.4	9.1	16.2
14	6727.2	5884.6	59.3	12.5	21.2
	13143.7	11778.1			
		1.12			

Tabella 24.

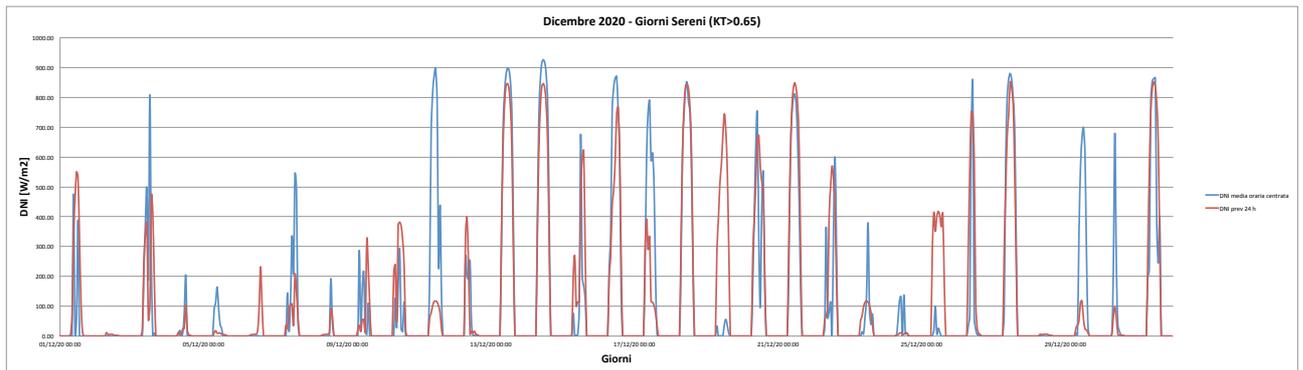


Figura 52.

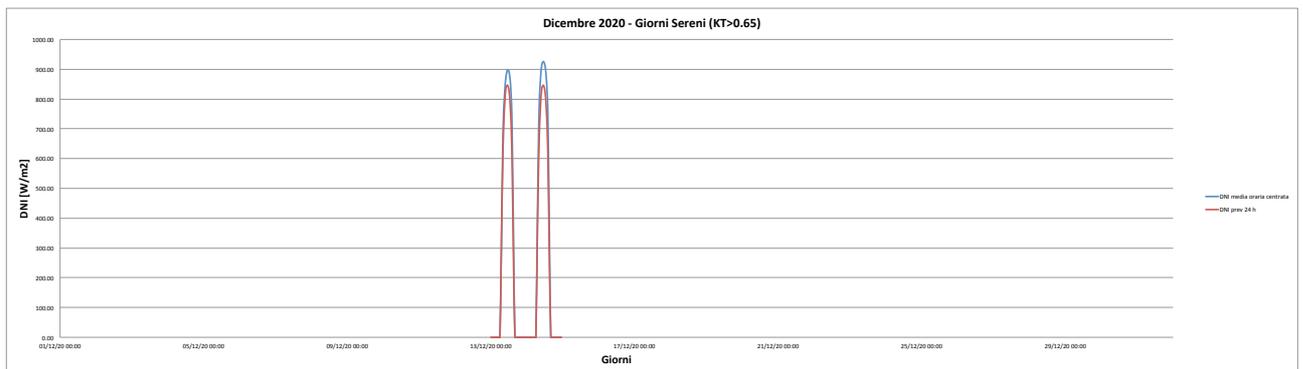


Figura 53.

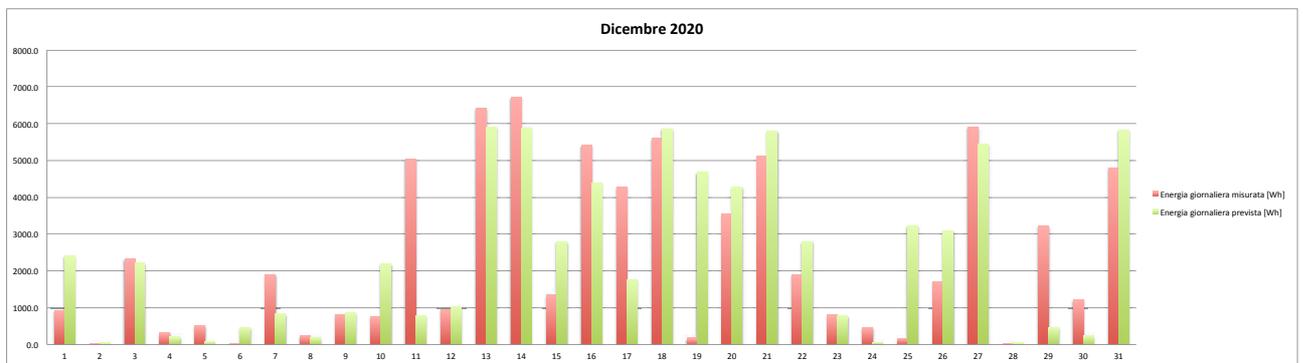


Figura 54.



Figura 55.

6.13 Risultati riassuntivi

Nella tabella seguente sono riassunti i valori annuali:

Anno 2020 Modello ENEA 24h	RMSE	MAE	MBE	RMSE%	MAE%	MBE%
Tutti i giorni 24 ore	162.66	75.92	26.92	71.11	33.19	11.77
Tutti i giorni sereni 24 ore	102.75	51.27	-12.4	29.16	14.55	-3.52
Tutti i giorni ore 7-16	241.97	157.22	62.96	49.15	31.93	12.79
Solo giorni sereni ore 7-16	141.26	91.27	-19.09	19.00	12.27	-2.57

Tabella 25.

Per le previsioni a 48h si riporta solo la tabella riassuntiva:

Anno 2020 Modello ENEA 48h	RMSE	MAE	MBE	RMSE%	MAE%	MBE%
Tutti i giorni 24 ore	186.80	89.24	30.56	81.66	39.00	13.36
Tutti i giorni sereni 24 ore	119.84	58.32	-16.68	34.00	16.55	-4.73
Tutti i giorni ore 7-16	277.96	185.29	72.50	56.46	37.64	14.73
Solo giorni sereni ore 7-16	167.07	105.38	-24.58	22.47	14.17	-3.31

Tabella 26.

L'energia annua misurata per il 2020 è stata di 2009 kWh/m² mentre l'energia annua dei soli giorni sereni è stata di 1404 kWh/m² che rappresenta circa il 70% dell'energia totale.

Si riporta di seguito il confronto tra il modello ENEA sviluppato partendo dalla previsione della GHI e il modello WRF che fornisce direttamente il valore della DNI. I dettagli del modello WRF sono riportati nel rapporto del PT 2019-21 della linea di attività L.1.25: Elaborazioni di dati e indici climatici per le valutazioni energetiche e la previsione della producibilità da fonti rinnovabili-parte III.

Anno 2020 Modello ENEA 24h	RMSE	MAE	MBE	RMSE%	MAE%	MBE%
Tutti i giorni 24 ore	162.66	75.92	26.92	71.11	33.19	11.77
Tutti i giorni sereni 24 ore	102.75	51.27	-12.4	29.16	14.55	-3.52
Tutti i giorni ore 7-16	241.97	157.22	62.96	49.15	31.93	12.79
Solo giorni sereni ore 7-16	141.26	91.27	-19.09	19.00	12.27	-2.57

Tabella 27.

Anno 2020 Modello WRF 24h	RMSE	MAE	MBE	RMSE%	MAE%	MBE%
Tutti i giorni 24 ore	220.23	108.89	78.48	96.27	47.6	34.31
Tutti i giorni sereni 24 ore	128.84	67.52	22.65	36.57	19.16	6.43
Tutti i giorni ore 7-16	325.25	224.55	176.50	66.06	45.61	35.85
Solo giorni sereni ore 7-16	166.00	112.20	49.69	22.33	15.09	6.68

Tabella 28.

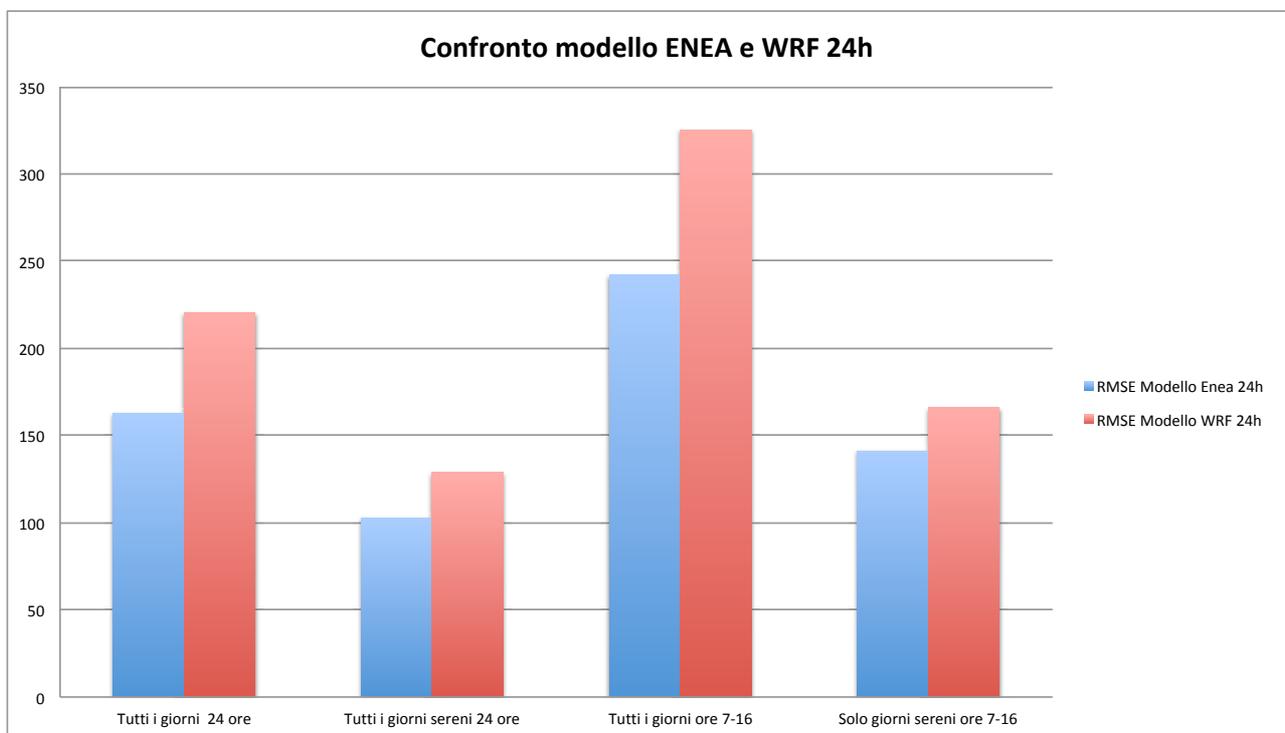


Figura 56.

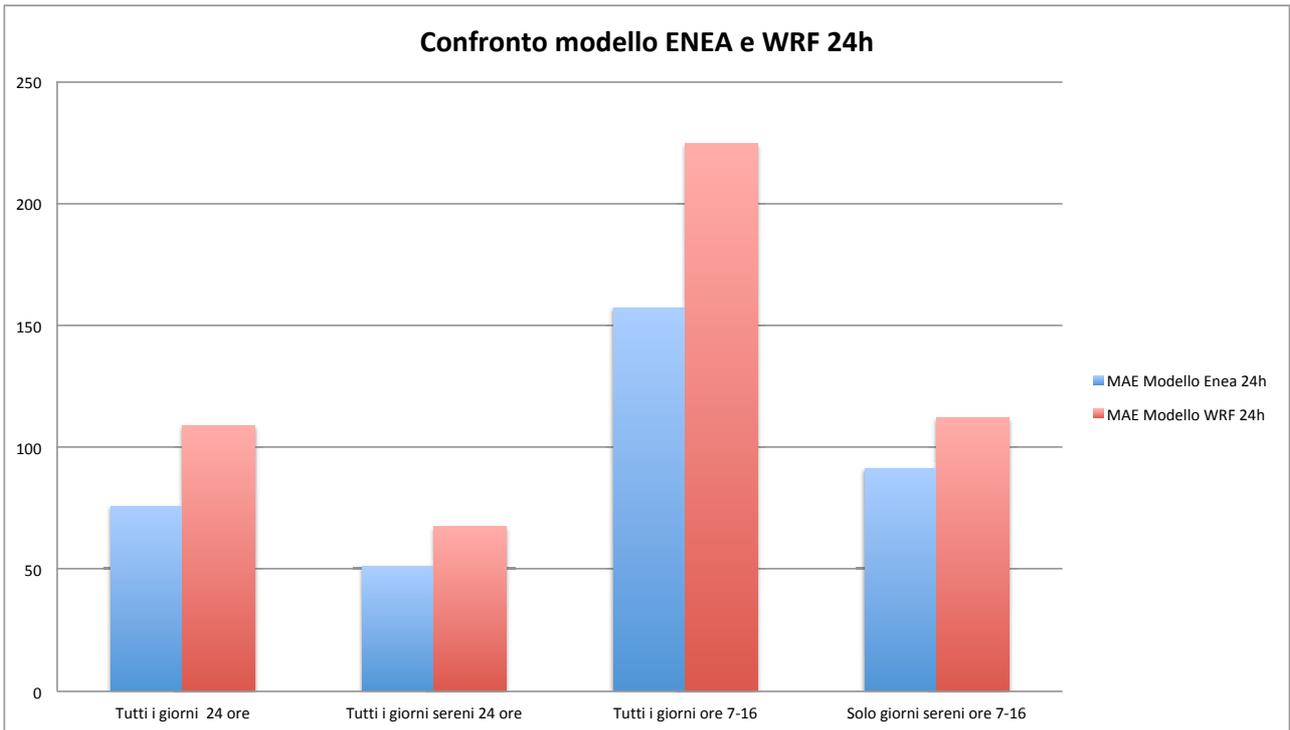


Figura 57.

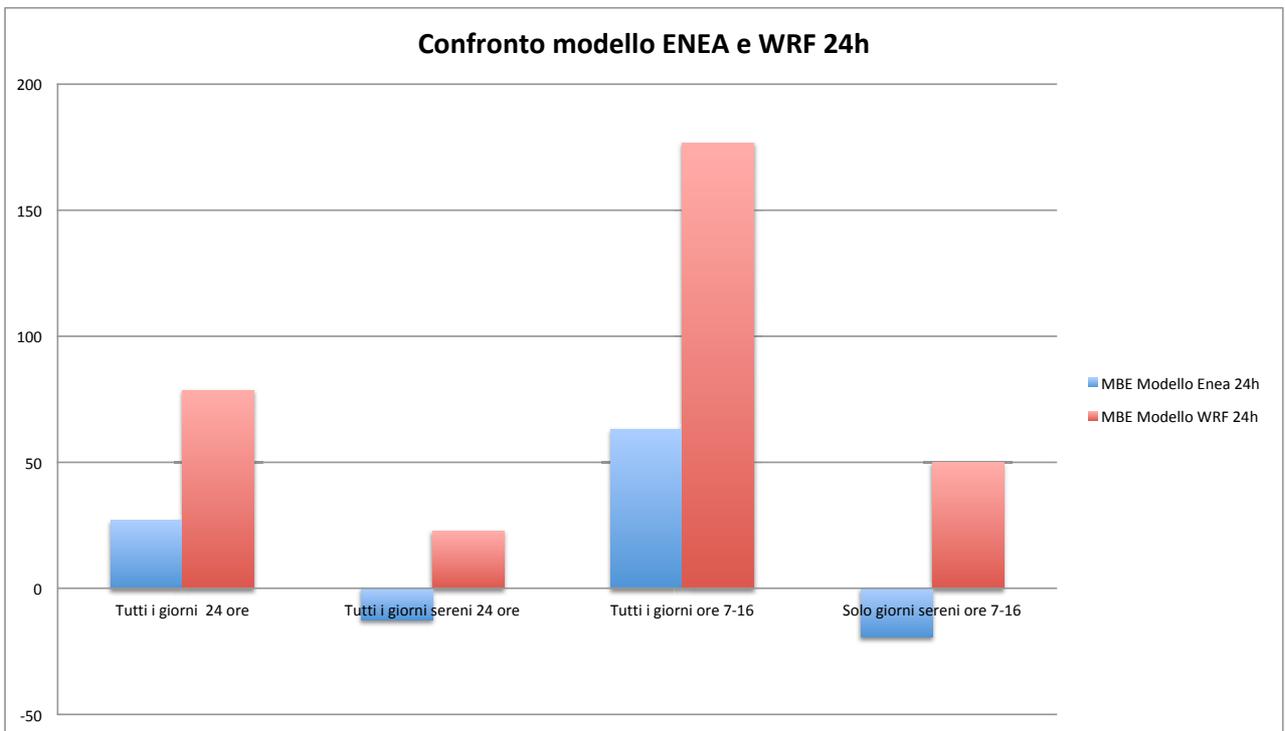


Figura 58.

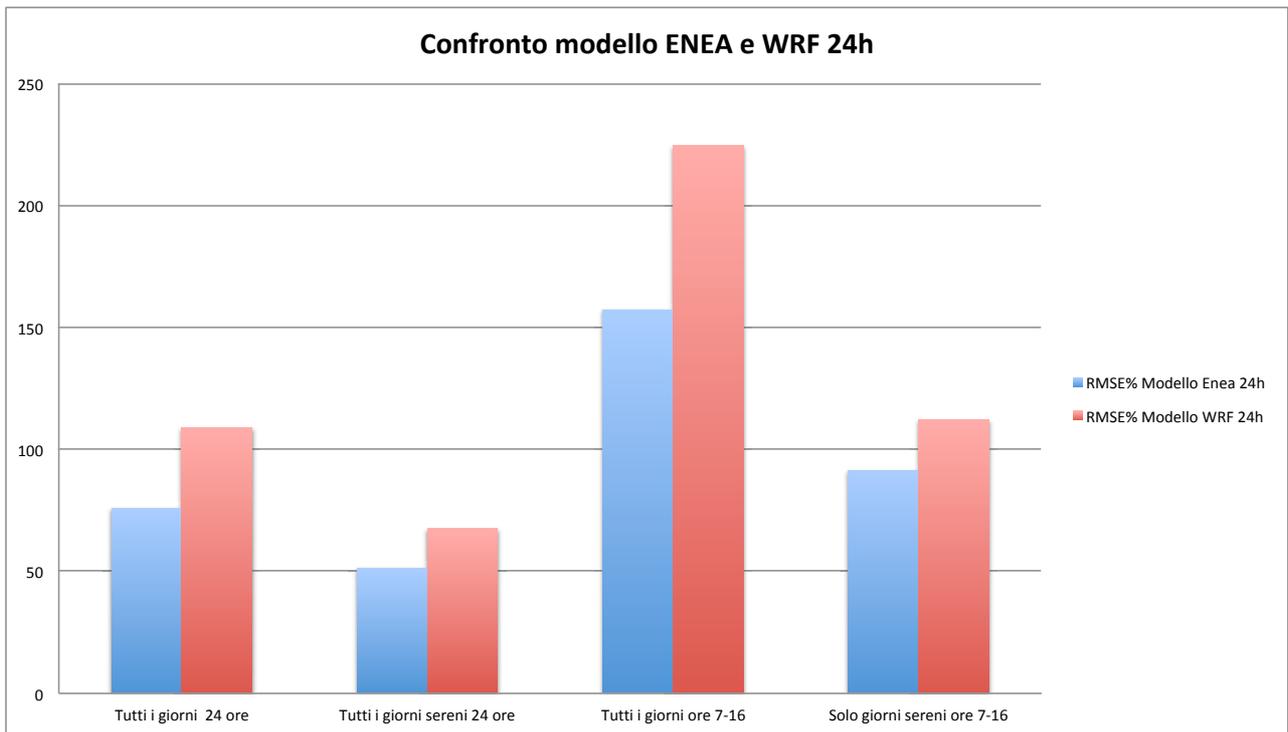


Figura 59.

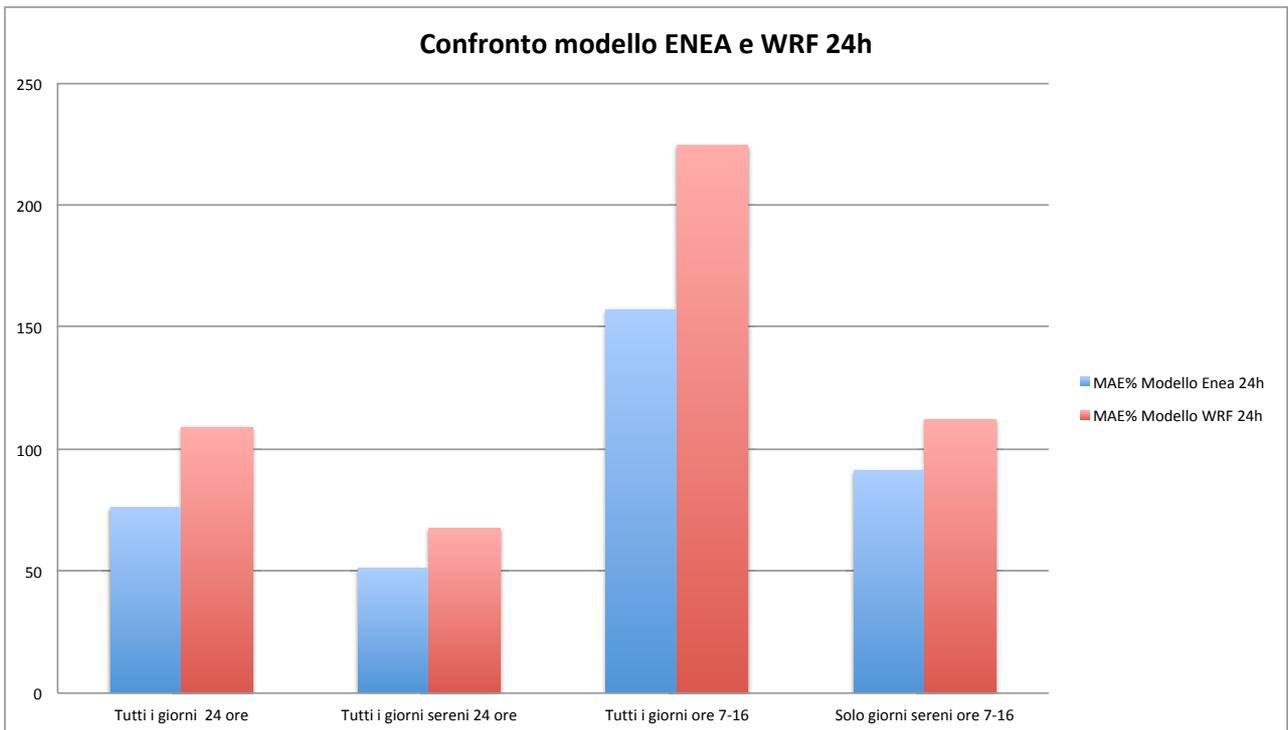


Figura 60.

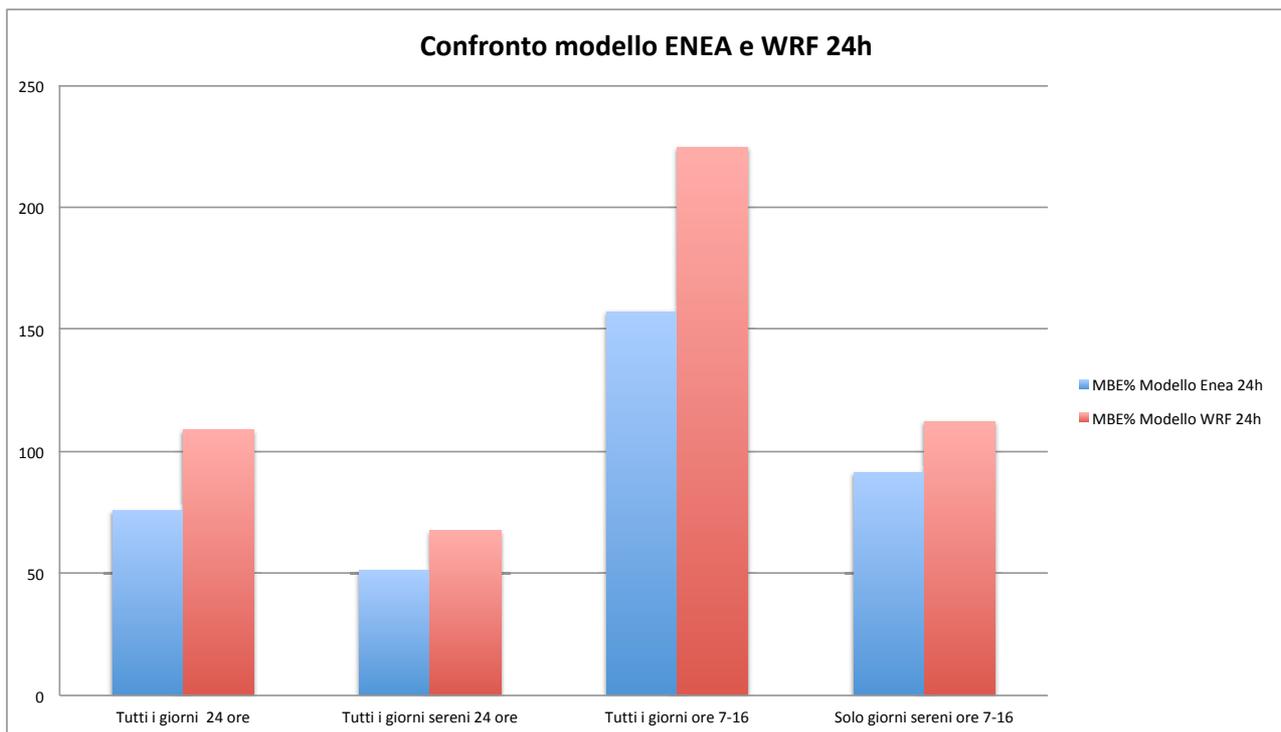


Figura 61.

6.14 Caso studio

Infine come titolo di esempio si riportano i risultati ottenuti su un ipotetico impianto CSP parabolico lineare che utilizza una miscela di sali fusi nitrati (sodio e potassio 60/40 w/w) installato nel centro ENEA della Casaccia con le seguenti caratteristiche:

- lunghezza stringa 600m
- orientamento N-S
- numero stringhe 4
- ore stoccaggio 12h
- funzionamento 24h giorno per 365 giorni anno
- potenza termica 3 MW
- integrazione con sistema di back-up heater a gas naturale.

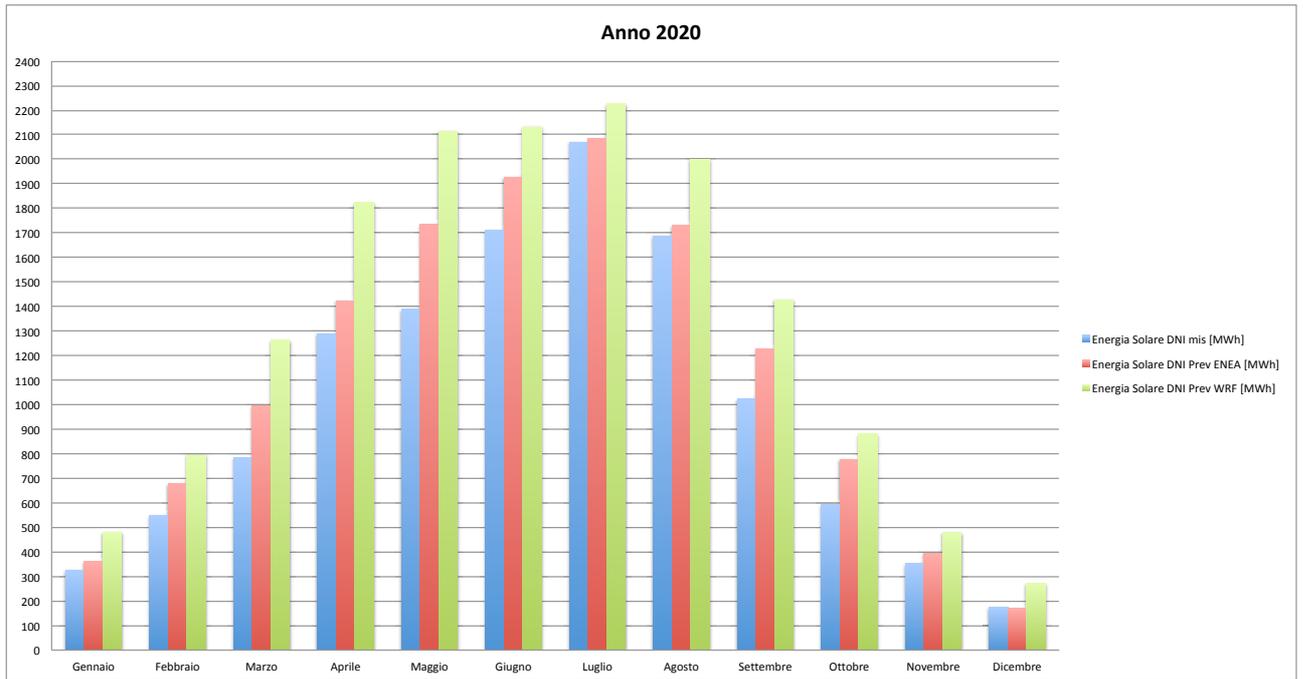


Figura 62.

Energia solare rappresenta l'energia termica prodotta dall'impianto utilizzando l'energia solare e *DNI mis*, *DNI Prev ENEA* e *DNI Prev WRF* rispettivamente la *DNI misurata* al suolo la *DNI prevista a 24h* con il modello ENEA e la *DNI prevista a 24h* con il modello WRF.

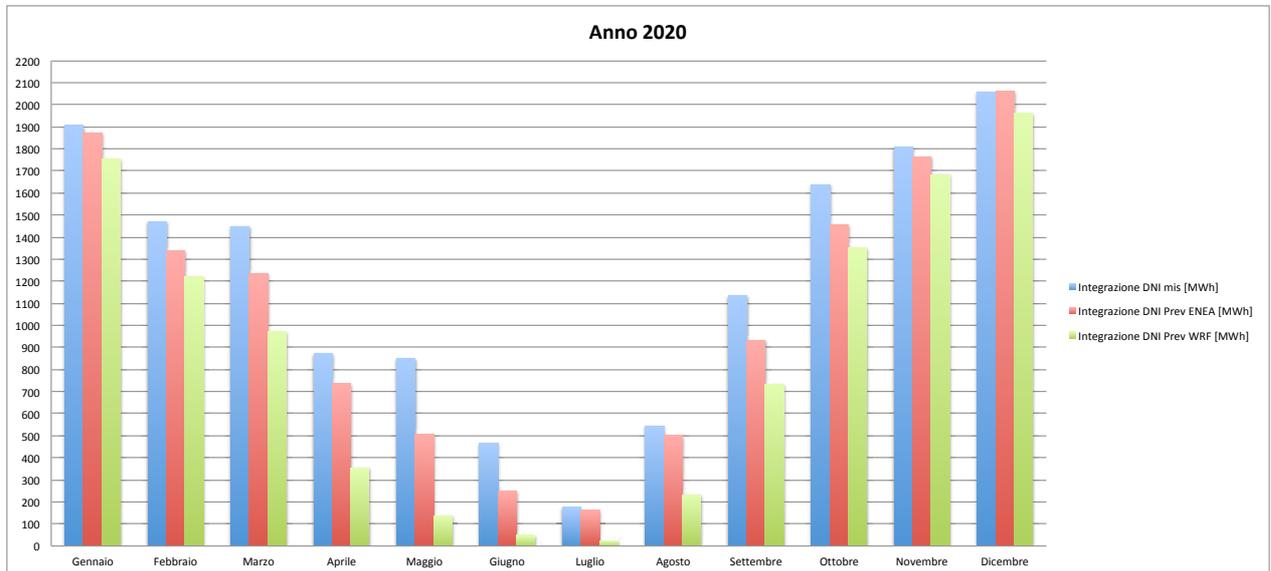


Figura 63.

Integrazione rappresenta l'energia termica prodotta dall'impianto utilizzando l'energia termica prodotta dal Back-up heater e *DNI mis*, *DNI Prev ENEA* e *DNI Prev WRF* rispettivamente la *DNI misurata* al suolo la *DNI prevista a 24h* con il modello ENEA e la *DNI prevista a 24h* con il modello WRF.

Conclusioni

In questo lavoro, abbiamo presentato i risultati ottenuti per la previsione a 24h e 48h della radiazione normale diretta (DNI) per il sito ENEA Casaccia (Roma).

Abbiamo confrontato due strade di previsione della radiazione. Una è quella di prendere tal quale il valore della radiazione elaborata dal modello WRF-ARW e l'altra è quella di prendere come output dal modello WRF la copertura nuvolosa e la piovosità e da queste due variabili calcolare il fattore K_c (indice di serenità) che va ad attenuare il valore della radiazione a cielo sereno della località studiata e quindi calcolare la previsione per la radiazione globale orizzontale (GHI). Dal modello sviluppato per la località studiata per calcolare la DNI dalla GHI si è calcolato il valore di previsione della DNI dal valore di previsione per la GHI. Dal confronto dei risultati ottenuti dai due modelli risulta che la seconda strada dà dei migliori risultati soprattutto per le previsioni a 24 ore.

Il modello di previsione per la DNI ha mostrato ottimi risultati per le giornate serene, giornate con maggiore radiazione e quindi con maggiore produttività energetica. Per le giornate parzialmente nuvolose e nuvolose l'errore aumenta notevolmente per il dato orario ma come energia giornaliera dà sempre risultati molto soddisfacenti.

Appendice. Sigle, abbreviazioni, grandezze, unità di misura

Grandezza	Definizione	Unità di misura
I_{bn}	Irradianza diretta su piano normale (DNI)	W/m^2
I	Irradianza globale su piano orizzontale (GHI)	W/m^2
I_b	Irradianza diretta su piano orizzontale	W/m^2
I_d	Irradianza diffusa su piano orizzontale	W/m^2
I_{on}	Irradianza extraatmosferica su piano normale	W/m^2
I_o	Irradianza extraatmosferica su piano orizzontale	W/m^2
ϑ_z	Angolo zenitale	rad o grado (°)
h_s	(Angolo di) elevazione (o altezza) del Sole	rad o grado (°)
L	Durata del giorno	ore
K_T	Coefficiente di trasmissione globale (al suolo)	adimensionale
K_{bn}	Coefficiente di trasmissione dell'irraggiamento diretto (al suolo)	adimensionale
k	Frazione della radiazione diffusa rispetto a quella globale (riferite entrambe al piano orizzontale)	adimensionale
ϑ	Angolo d'incidenza dei raggi solari	rad o grado (°)
α, β	Parametri del modello di Boland-Ridley	adimensionali
ϕ	Latitudine (geografica)	rad o grado (°)
δ	Declinazione solare	rad o grado (°)
ω	Angolo orario	rad o grado (°)
ω_s	Angolo orario dell'alba	rad o grado (°)
t_s	Ora (o tempo) solare vero; a volte detto anche tempo solare apparente	ore (h) e/o minuti
E_t	Equazione del tempo	[di solito in] minuti

Nota: nel testo gli acronimi DNI e GHI sono usati sia nell'accezione di irradianza sia in quella di irradiazione (giornaliera, giornaliera media mensile o annua). Nel primo caso, trattandosi di potenza per unità di superficie, l'unità di misura è il W/m^2 ; invece le irradiazioni corrispondono dimensionalmente all'energia per unità di superficie e si esprimono in J/m^2 , MJ/m^2 o kWh/m^2 .

Prefissi (nelle unità di misura)	Nome	Valore
<i>n</i>	nano-	10^{-9}
μ	micro-	10^{-6}
<i>k</i>	kilo-	10^3
<i>M</i>	mega-	10^6

Altri simboli	Significato
÷	intervallo

Riferimenti bibliografici

- [1] F. Lanini (2010), Division of Global Radiation into Direct Radiation and Diffuse Radiation, Master's thesis, Faculty of Science, University of Bern. Documento reperito in rete.
- [2] Erbs, D.; Klein, S.; Duffie, J. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Sol. Energy* 1982, 28, 293–302.
- [3] Liu, B.Y.H.; Jordan, R.C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Sol. Energy* 1960, 4, 1–19.
- [4] Collares-Pereira, M.; Rabl, A. The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Sol. Energy* 1979, 22, 155–164.
- [5] M. Iqbal (1983), *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press Canada, Don Mills (Ontario, Canada), 1983. ISBN: 0-12-373750-8. Pagine 390.
- [6] Reindl, D.T.; Beckman, W.A.; Duffie, J.A. Diffuse fraction correlations. *Sol. Energy* 1990, 45, 1–7.
- [7] Models of Diffuse Solar Fraction, in *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, cap. 8, p. 193-219.
- [8] Boland J., Huabg J. and Ridley B., Decomposing global solar radiation into its direct and diffuse components, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28 (2013) 749-756.
- [9] Iatauro D., Signoretti P., Balog I., Caputo G. and Spinelli F., *Elaborazioni di dati e indici climatici per le valutazioni energetiche e la previsione della producibilità da fonti rinnovabili. Parte III: Sez.A: Ipostesi di aggiornamento della zonizzazione climatica italiana; Sez.B: Modelli di previsione per la radiazione solare globale orizzontale*, PT 2019-21 nella linea di attività L.1.25, Febbraio 2022